

UNTERSUCHUNGEN ZUR WAHRNEHMUNG VON OBERFLÄCHEN- UND BELEUCHTUNGSFARBEN

– CHROMATISCHE SZENENSTATISTIKEN UND TEMPORALE INTEGRATION –

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Philosophischen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität
zu Kiel

vorgelegt von
Anna Katharina Hirschmüller

Kiel
2016

Erstgutachter: PD Dr. Jürgen Golz

Zweitgutachter: Prof. Dr. Christian Kaernbach

Tag der mündlichen Prüfung: 27. 06. 2016

Durch den zweiten Prodekan Prof. Dr. John Peterson

zum Druck genehmigt: 01. 07. 2016

Zusammenfassung

Um einen annähernd farbkonstanten Eindruck von Oberflächenfarben zu ermöglichen, muss das visuelle System die im proximalen Reiz verbundenen Beleuchtungs- und Oberflächeninformationen trennen - eine Aufgabe, die als Farbkonstanzproblem bezeichnet wird. Zwei zentrale Ansätze formulieren Erklärungen, wie das visuelle System hierbei vorgehen könnte. Zum einen könnte durch einfache elementare Mechanismen des visuellen Systems eine Neutralisierung oder Eliminierung des Beleuchtungseinflusses erreicht werden, zum anderen könnte das visuelle System eine Schätzung der Beleuchtung etablieren, die möglicherweise dann auch für andere Prozesse und Leistungen zur Verfügung steht. Eine klassische Idee zur Lösung des Farbkonstanzproblems ist, dass das visuelle System die im proximalen Reiz gleichzeitig vorhandenen Informationen vieler verschiedener Oberflächen nutzt. Wenn auf mehrere Oberflächen dieselbe Beleuchtung fällt, entstehen Regelmäßigkeiten, welche sich durch die globale räumliche Integration über die Oberflächen hinweg, als chromatische Szenenstatistiken beschreiben lassen. Das visuelle System könnte diese chromatischen Szenenstatistiken als Hinweisreize für die chromatische Eigenschaft der vorherrschenden Beleuchtung nutzen. Für zwei solcher Hinweisreize, den chromatischen Mittelwert und die Korrelation von Luminanz und Rötlichkeit (Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation), wurde bereits gezeigt, dass sie vom visuellen System als Hinweisreize bei der Farbwahrnehmung genutzt werden. Neben einer Analyse aller gleichzeitig vorhandenen Informationen kann das visuelle System auch eine Analyse über zeitlich aufeinanderfolgende Informationen vornehmen. Die zentrale Frage, die in dieser Arbeit untersucht wird ist, ob das visuelle System bei einer solchen zeitlichen Informationsanalyse chromatische Szenenstatistiken ebenfalls als Hinweisreize auf die Beleuchtung nutzt. Darüber hinaus wurde untersucht, ob ein solcher zeitlicher Informationsintegrationsprozess flexibel auf relevante Veränderungen der Umwelt reagieren kann, um ein farbkonstantes Perzept der Oberflächen zu ermöglichen. Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen weisen darauf hin, dass das visuelle System sowohl den chromatischen Mittelwert als auch die Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation für diese Zwecke nutzt. Jedoch zeigt sich für die Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation, dass ihre Nutzung von ihrer Ausprägung beeinflusst zu sein scheint. Zudem weisen die Untersuchungen dieser Arbeit darauf hin, dass das visuelle System bei starken Veränderungen der Beobachtungsbedingungen in der Lage ist, den Prozess der zeitlichen Informationsintegration flexibel zu steuern und an die veränderte Situation anzupassen. Diese Eigenschaften des visuellen Systems können sehr gut im Rahmen eines Beleuchtungsschätzungsansatzes interpretiert werden. In einem letzten Schritt wurde die räumliche Integration visueller Information untersucht mit dem

Ziel, anhand von Urteilen über Beleuchtungswechsel einen alternativen methodischen Untersuchungszugang zu schaffen, der die Wirkung der Beleuchtungsveränderung direkt erfasst. Aus einer in der Literatur weit zitierten und akzeptierten Arbeit wurde das Untersuchungsparadigma adaptiert. Auch wenn die mit dem verwendeten Paradigma gewonnenen Ergebnisse anderer Autoren in der Literatur große Akzeptanz finden, zeigen die hier vorgenommenen Untersuchungen, dass die gewählte Untersuchungsmethode ungeeignet ist, da die Ergebnisse nahelegen, dass bei dieser Erhebung von direkten Urteilen über einen Beleuchtungswechsel, Wahrnehmungsprozesse nicht isoliert von kognitiv überlagernden Vorstellungen von Beleuchtungswechseln erfasst werden können.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	i
Inhaltsverzeichnis	iii
Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	xiii
1. Grundlagen der Farbwahrnehmung.....	3
1.1 Zur Gliederung dieser Arbeit.....	3
1.2 Physikalische Beschreibung.....	4
1.3 Psychophysikalische Beschreibung	7
1.4 Psychophysikalische und sinnesphysiologische Analogie.....	14
1.4.1 Das MacLeod-Boynton Chromatizitätsdiagramm	16
1.5 Natürliche Lichtquellen und Oberflächen	19
1.6 Farbwahrnehmung aus psychologischer Perspektive.....	22
1.6.1 Elementaristische Perspektive	23
1.6.2 Funktionalistische Theorieperspektive	24
1.6.2.1 Computationaler Ansatz	24
1.6.3 Interdisziplinäre integrative Perspektive.....	24
1.6.3.1 Farbwahrnehmung im integrativen Wahrnehmungsmodell..	26
2. Farbkonstanz	27
2.1 Das Farbkonstanzproblem.....	27
2.2 Adaptationale Ansätze.....	31
2.2.1 von Kries Adaptation	31
2.2.2 Relational Colour Constancy	33
2.3 Beleuchtungsschätzungsansätze	35
2.3.1 Regularitäten unterschiedlicher Aggregationsebenen: multiplikative Normalisierbarkeit und chromatischer Mittelwert	36
2.3.1.1 Multiplikative Normalisierbarkeit - Veränderungen im Farbsignal einzelner Oberflächen.....	36

2.3.1.2 Chromatischer Mittelwert als Hinweisreiz für die Beleuchtungsschätzung - eine Szenenstatistik 1. Ordnung	37
2.3.2 Regularitäten unterschiedlicher Aggregationsebenen: Chromatizitätsabhängige Luminanzverschiebungen und Luminanz- Rötlichkeits-Korrelation	39
2.3.2.1 Chromatizitätsabhängige Luminanzverschiebungen – Veränderungen im Farbsignal einzelner Oberflächen	40
2.3.2.2 Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation - eine Szenenstatistik 2. Ordnung.....	40
2.3.2.2.1 Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation als Hinweisreiz für die Beleuchtungsschätzung.....	44
2.3.3 Komplexe Umweltinformationen und direkte Beleuchtungsinformationen	45
2.3.4 Zwischenfazit	46
2.4 Temporale Informationsintegration	48
2.4.1 Zeitliche Aspekte chromatischer Adaptation	48
2.4.2 Mechanismen und Hinweisreize zeitlicher Informationsintegration bei der Beleuchtungsschätzung	49
2.5 Hypothesen	56
2.5.1 Forschungsfrage I – Die Rolle chromatischer Szenenstatistiken bei der temporalen Informationsintegration.....	56
2.5.2 Forschungsfrage II – Flexible Reagibilität des visuellen Systems auf grundlegende Veränderungen der visuellen Informationen	58
2.5.3 Forschungsfrage III – Chromatische Regularitäten bei der Beurteilung von Beleuchtungswechseln mit natürlichen Stimuli	59
3. Forschungsfrage I – Die Rolle chromatischer Szenenstatistiken bei der temporalen Informationsintegration.....	63
3.1 Allgemeine Methoden.....	63
3.2 Experiment I. Untersuchung des Mittelwertes als chromatische Szenenstatistik bei der temporalen Integration visueller Information.....	67
3.2.1 Ergebnisse – Experiment I	72
3.2.2 Diskussion – Experiment I.....	76

3.3	Experiment II. Untersuchung der Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation als chromatische Szenenstatistik, die bei der temporalen Informationsintegration verwendet wird	77
3.3.1	Ergebnisse – Experiment II.....	81
3.3.2	Diskussion – Experiment II.....	83
3.4	Experiment III. Untersuchung der Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation als chromatische Szenenstatistik bei der temporalen Informationsintegration ..	84
3.4.1	Veränderungen am Versuchsaufbau in Experiment III	84
3.4.2	Ergebnisse – Experiment III	87
3.4.3	Diskussion – Experiment III	90
4.	Forschungsfrage II – Kann das visuelle System bei der temporalen Informationsintegration flexibel auf grundlegende Veränderungen reagieren? ..	93
4.1	Methoden.....	95
4.1.1	Allgemeine Methoden I.....	95
4.1.2	Spezifische Operationalisierungen für Experiment IV	97
4.1.3	Spezifische Operationalisierungen für Experiment V	99
4.1.4	Allgemeine Methoden II.....	101
4.2	Ergebnisse – Experiment IV.....	107
4.3	Ergebnisse – Experiment V	114
4.4	Diskussion der Experimente IV und V	121
5.	Forschungsfrage III – Die Rolle chromatischer Regularitäten bei der direkten Beurteilung von Beleuchtungswechseln.....	123
5.1	Allgemeine Methoden.....	124
5.1.1	Berechnung der Beleuchtungswechsel unter verschiedenen Korrekturmodi.....	127
5.1.2	Bestimmung der Abweichung verschiedener Beleuchtungswechselsimulationen	130
5.2	Experiment VI	133
5.2.1	Ergebnisse – Experiment VI	137
5.2.2	Diskussion – Experiment VI	141
5.3	Experiment VII	142

5.3.1	Ergebnisse – Experiment VII	145
5.3.2	Diskussion – Experiment VII.....	148
5.4	Experiment VIII.....	150
5.4.1	Ergebnisse – Experiment VIII.....	151
5.4.2	Diskussion – Experiment VIII	155
6.	Zusammenfassende Diskussion	159
6.1	Forschungsfrage I - Die Rolle chromatischer Szenenstatistiken bei der temporalen Informationsintegration	159
6.2	Forschungsfrage II - Dynamische Anpassungsprozesse bei der temporalen Informationsintegration	162
6.3	Welches Bild der temporalen Informationsintegration ergibt sich nach der Untersuchung der Forschungsfragen I und II?	162
6.4	Forschungsfrage III - Direkte Urteile über Beleuchtungswechsel.....	164
7.	Literaturverzeichnis	167
Anhang A	179
Anhang B	203
Anhang C	223
Anhang D	247

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1.1:** Beispiele für die elektromagnetischen Spektren zweier möglicher Lichter. Ein monochromatisches Licht $e_m(\lambda)$ (blau), das sich durch nur eine in seiner Energie von 0 verschiedenen Stelle im sichtbaren elektromagnetischen Spektrum auszeichnet. Die rote Funktion $e_1\lambda$ beschreibt die spektrale Energieverteilung von beispielsweise abendlichem Sonnenlicht (4500 K) über den sichtbaren Teil des elektromagnetischen Spektrums hinweg. 6
- Abbildung 1.2:** Intensitätsänderung eines Lichts. Ausgehend von der spektralen Energieverteilung von Sonnenlicht $e_1(\lambda)$ (●) werden die Auswirkungen einer Intensitätsverdoppelung (●) und einer Halbierung der Intensität (●) dargestellt. 6
- Abbildung 1.3:** Additive Mischung zweier Lichter. Beispiel für die Mischung der Lichter $e_1(\lambda)$ (●) und $e_2(\lambda)$ (●), woraus sich das Mischlicht $e_1\lambda + e_2\lambda$ (●) ergibt. 7
- Abbildung 1.4:** Zapfensensitivitätsfunktionen für den kurzwellig sensitiven ($s(\lambda)$), den mittelwellig sensitiven ($m(\lambda)$) und den langwellig sensitiven Zapfen ($l(\lambda)$) im 2° Abgleichsparadigma nach Stockman et al. (1993) 16
- Abbildung 1.5:** MacLeod-Boynton Chromatizitätsdiagramm. Spektraler Linienzug (schwarz) und natürliche Beleuchtungen ○ zwischen 4000 Kelvin ● und 20000 Kelvin ● im MacLeod-Boynton Chromatizitätsdiagramm, unter Verwendung der Zapfensensitivitätsfunktionen von Stockman et al. (1993)..... 19
- Abbildung 1.6:** Relative spektrale Energieverteilungen natürlicher Lichter mit einer korrelierten Farbtemperatur zwischen 4000 Kelvin und 20000 Kelvin, die repräsentativ für verschiedene natürliche Lichtsituationen sind. 21
- Abbildung 1.7:** Beispiel für ein von einer Oberfläche reflektiertes Farbsignal $C(\lambda)$. $r(\lambda)$ beschreibt die spektrale Oberflächenreflektanzfunktion für die Oberfläche eines gelblich wirkenden Munsell-Chips (2.5 Y 7/6) (Hiltunen, n.d.), auf die die Beleuchtung $e_2(\lambda)$ fällt..... 22
- Abbildung 2.1:** Schematische Darstellung eines fiktiven Sets verschiedener Szenen unter zwei möglichen Beleuchtungen. Weiße Dreiecke stehen für die Szenen des fiktiven Sets unter Beleuchtung I, ausgefüllte Dreiecke stehen für dieselben Szenen des fiktiven Sets unter Beleuchtung II. Der graue Bereich kennzeichnet den Bereich in dem sich die Sets im Hinblick auf die mittlere Rötlichkeit des

proximalen Reizes einer Szene überschneiden, wodurch ein Ambiguitätsbereich entsteht, innerhalb dessen die Rötlichkeit des chromatischen Mittelwerts nicht mehr genügt, um zwischen Szenen unter Beleuchtung I und Szenen unter Beleuchtung II zu unterscheiden. Nimmt man jedoch die Korrelation zwischen Luminanz und Rötlichkeit hinzu, lassen sich zwei Cluster bilden und die Szenen einer der Beleuchtungen zuordnen..... 42

Abbildung 3.1: Schematische Ablaufskizze, mit beispielhafter Aneinanderreihung zweier Zyklen. Zusätzlich sind die zentralen Angaben zur Präsentation des Stimulusfarbensets und der Testfarben zusammengefasst. 64

Abbildung 3.2: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für *Experiment I*. Die Chromatizitäten des Stimulusfarbensets sind als Dreiecke in den Farben der jeweiligen Bedingungen eingezeichnet, ★ markieren die Mittelwerte der Stimulusfarbensets. Die grauen Linien markieren die Lage der Teststrecken für die Erfassung der Grenze zwischen Rot und Grün (horizontale Linien), bzw. zwischen Blau und Gelb (vertikale Linien). 70

Abbildung 3.3: Ergebnisse für die Grenze zwischen Rot und Grün in *Experiment I*. Mittelwerte für alle Bedingungen (■ Neutral, ■ Rot, ■ Grün) per Teststrecke. Die Rohdatenpunkte sind als Kreise eingezeichnet (○ Neutral, ○ Rot, ○ Grün), ★ markieren die Mittelwerte der Stimulusfarbensets. Für Mittelwerte über alle Versuchspersonen wurde das arithmetische Mittel aus allen Einzelwerten (Rohdatenpunkte) pro Bedingung berechnet. 73

Abbildung 3.4: Ergebnisse für die Grenze zwischen Blau und Gelb in *Experiment I*. Mittelwerte für alle Bedingungen (■ Neutral, ■ Blau, ■ Gelb) per Teststrecke. Die Rohdatenpunkte sind als Kreise eingezeichnet (○ Neutral, ○ Blau, ○ Gelb), ★ markieren die Mittelwerte der Stimulusfarbensets. Für Mittelwerte über alle Versuchspersonen wurde das arithmetische Mittel aus allen Einzelwerten (Rohdatenpunkte) pro Bedingung berechnet. 75

Abbildung 3.5: Stimuli für *Experiment II*. Lage der Stimulusfarben für die positive-LRK-Bedingung (▲), die Null-LRK-Bedingung (▲) und die negative-LRK-Bedingung (▲) im (*I*, *Luminanz*)-Diagramm. Der Stern (★) markiert den chromatischen Mittelwert der Stimulusfarbensets. 80

Abbildung 3.6: Ergebnisse für *Experiment II*. Die Quadrate zeigen die errechneten Kategoriengrenzen für die positive-LRK-Bedingung (■), die negative-LRK-Bedingung (■) und die Null-LRK-Bedingung (■). Die Balken zeigen den Standardfehler des Mittelwerts und ★ markiert die Mittelwerte der

Stimulusfarbensets. Für Mittelwerte über alle Versuchspersonen wurde das arithmetische Mittel aus allen Einzelwerten (Rohdatenpunkte) pro Bedingung berechnet.	83
Abbildung 3.7: Stimuli für Experiment III. Lage der Stimulusfarben für die positive-LRK-Bedingung (▲), die Null-LRK-Bedingung (▲) und die negative-LRK-Bedingung (▲) im (<i>I</i> , <i>Luminanz</i>)-Diagramm. Der Stern (★) markiert die chromatischen Mittelwerte der Stimulusfarbensets.....	85
Abbildung 3.8: Ergebnisse für <i>Experiment III</i> . Die Quadrate zeigen die durch den Mittelwert geschätzten Kategoriengrenzen für die positive-LRK-Bedingung (■), die negative-LRK-Bedingung (■) und die Null-LRK-Bedingung (■). Die Balken zeigen die Standardfehler des Mittelwerts, der Stern (★) den Mittelwert der Stimulusfarbensets. Für Mittelwerte über alle Versuchspersonen wurde das arithmetische Mittel aus allen Einzelwerten (Rohdatenpunkte) pro Bedingung berechnet.	89
Abbildung 4.1: skizziert das allgemeine Untersuchungsparadigma. Sie zeigt den Ablauf eines Zyklus, sowie den direkten Anschluss des nächsten Zyklus, inklusive des roten (rote Punkte) und grünen (grüne Punkte) Stimulusfarbensets und dessen mittlere <i>I</i> -Chromatizität (rote bzw. grüne Linie). Die grauen Quadrate zeigen die Testfarben (wobei Versuchspersonen spezifische Anpassungen (Abschnitt 4.2, 4.3) nicht berücksichtigt sind), sowie die zeitliche Position der Messungen. Jede Stimulusfarbe wurde für 500 ms präsentiert, jede Testfarbe für 1500 ms (diese Dauer wird in der Abbildung nicht zeitlich berücksichtigt)......	96
Abbildung 4.2: Skizze des Versuchsaufbaus.	99
Abbildung 4.3: Ergebnisse aus <i>Experiment IV</i> . Relative Häufigkeit der Rot-Kategorisierungen der Testfarben für die fünf Bedingungen (● Baseline grün, ● Baseline rot, ● Kontrollbedingung, ● zeitkompensierte Kontrollbedingung, ● Experimentalbedingung Raumwechsel). Die Kurven zeichnen die jeweils angefitzten Funktionen, die Fehlerbalken bilden die 95%-Konfidenzintervalle der Schwelle ab.....	111
Abbildung 4.4: <i>Experiment IV</i> . Schätzung der Schwellen für die Kontrollbedingung, die Experimentalbedingung mit Resetauslöser und die zeitkompensierte Kontrollbedingung. Die Punkte zeigen den Schätzer für die Schwelle, die Fehlerbalken das 95%-Konfidenzintervall, welches mit Hilfe einer parametrischen Bootstrap-Prozedur bestimmt wurde.	112

- Abbildung 4.5:** *Experiment IV*. Schätzung der Steigungen für die Kontrollbedingung, die Experimentalbedingung mit Resetauslöser und die zeitkompensierte Kontrollbedingung. Die Punkte zeigen den Schätzer für die Steigung, die Fehlerbalken das 95%-Konfidenzintervall, welches mit Hilfe einer parametrischen Bootstrap-Prozedur bestimmt wurde. 113
- Abbildung 4.6:** Ergebnisse aus *Experiment V*. Relative Häufigkeit der rot-Kategorisierungen der Testfarben für die fünf Bedingungen (● Baseline grün, ● Baseline rot, ● Kontrollbedingung, ● zeitkompensierte Kontrollbedingung, ● Experimentalbedingung rotes Aufleuchten, ● Experimentalbedingung grünes Aufleuchten). Die Kurven zeichnen die jeweils angefitzten Funktionen, die Fehlerbalken bilden die 95%-Konfidenzintervalle um die Schwelle ab. 116
- Abbildung 4.7:** Ergebnisse *Experiment V* – Schätzer für die Schwelle mit 95%-Konfidenzintervallen. Da die gemessenen Werte nicht den vorab postulierten Hypothesen entsprechen, wurde auf die Erhebung der zeitkompensierten Kontrollbedingung bei den Versuchspersonen 4 und 5 verzichtet. 118
- Abbildung 4.8:** Ergebnisse *Experiment V* – Schätzer für die Steigungen mit 95%-Konfidenzintervallen. Die zeitkompensierte Kontrollbedingung wurde für VP 4 und VP 5 nicht erhoben. 120
- Abbildung 5.1:** Allgemeine Ablaufskizze eines Durchgangs. In jedem Durchgang wurden zwei Beleuchtungswechsel präsentiert. Ein Beleuchtungswechsel bestand aus der Präsentation eines Seuratstimulus unter der Ausgangsbeleuchtung und der anschließenden Präsentation desselben Seuratstimulus unter der Zielbeleuchtung, wobei die zur Simulation des Beleuchtungswechsels im Zielstimulus vorhandenen Hinweisreize in Abhängigkeit von der Bedingung variierten. Ein Durchgang beginnt mit der Präsentation eines dunklen Bildschirms, gefolgt vom ersten Beleuchtungswechsel. Nach einer Pause von 1 s, bei der der Bildschirm wieder dunkel wurde, wurde der zweite Beleuchtungswechsel präsentiert. Anschließend wurde der Bildschirm wieder dunkel und die Versuchsperson hatte die Aufgabe ihre Wahl einzugeben. 126
- Abbildung 5.2:** Beispiel für die Stimuli in einer *XN* vs. *XN&CI* Entscheidungsaufgabe. Der Kreis dient dem leichteren Vergleich der Auswirkungen von Beleuchtungswechsel und gewählten Korrekturmodus. 136
- Abbildung 5.3:** Relative Häufigkeiten der Präferenz von exakt normalisationskompatibel korrigierten Beleuchtungswechseln vor natürlichen Beleuchtungswechseln in Abhängigkeit von der relativen Abweichung der

Zapfenerregungsverhältnisse (ΔCER). Die an die Gegebenheiten der Stimuli angepasste Berechnung der relativen Abweichung der Zapfenerregungsverhältnisse erfolgt in Anlehnung an die Berechnungsweise von Nascimento und Foster (1997). Die Intervalle wurden mit einer festen Intervallbreite von 0.01 vom Ursprung ausgehend gebildet..... 138

Abbildung 5.4: Relative Häufigkeit der Bevorzugung von exakt normalisationskompatiblen Beleuchtungswechseln vor natürlichen Beleuchtungswechseln in Relation zum Grad der Abweichung $\Delta(NAT, XN)$ dieser Bedingungen. Dargestellt sind Intervalle mit einer festen Intervallbreite von 0.00025..... 138

Abbildung 5.5: Relative Häufigkeit der Bevorzugung von exakt normalisationskompatiblen und chromatisitäts-intensitäts korrigierten Beleuchtungswechseln vor exakt normalisationskompatiblen Beleuchtungswechseln, in Relation zum Grad der Abweichung $\Delta(XN\&CI, XN)$ dieser Bedingungen. Feste Intervallbreite 0.00025. 139

Abbildung 5.6: Relative Häufigkeit der Bevorzugung von exakt normalisationskompatiblen und chromatisitäts-intensitäts korrigierten Beleuchtungswechseln vor natürlichen Beleuchtungswechseln, in Relation zum Grad der Abweichung $\Delta(NAT, XN\&CI)$ dieser Bedingungen. Feste Intervallbreite 0.000125..... 140

Abbildung 5.7: Beispiel für die in *Experiment VII* verwendeten Stimuli. Auf der linken Seite ist jeweils ein Stimulusbeispiel für Blumen, Früchte und Blätter jeweils unter einer natürlich simulierten CIE Tageslichtbeleuchtung von 7000 Kelvin. Rechts ist das reflektierte Licht der in die Stimulusgestaltung eingehenden Oberflächenreflektanzspektren von Blumen, Früchten und Bäumen (R. O. Brown, 2003) unter der CIE Tageslichtbeleuchtung von 7000 Kelvin abgebildet..... 144

Abbildung 5.8: Ergebnisse *Experiment VII*. Relative Häufigkeiten der Präferenz von exakt normalisationskompatibel korrigierten Beleuchtungswechseln vor natürlichen Beleuchtungswechseln in Abhängigkeit von der relativen Abweichung der Zapfenerregungsverhältnisse ($\Delta(CER)$), in Anlehnung an Nascimento und Foster (1997); feste Intervallbreite: 0.01)..... 146

Abbildung 5.9: Ergebnisse *Experiment VII*. Relative Häufigkeit der Bevorzugung von exakt normalisationskompatiblen Beleuchtungswechseln vor natürlichen

Beleuchtungswechseln in Relation zum Grad der Abweichung $\Delta(NAT, XN)$ dieser Bedingungen. Feste Intervallbreite 0.00025.	147
Abbildung 5.10: Ergebnisse <i>Experiment VII</i> . Relative Häufigkeit der Bevorzugung von exakt normalisationskompatiblen und chromatizitäts-intensitäts korrigierten Beleuchtungswechseln vor exakt normalisationskompatiblen Beleuchtungswechseln, in Relation zum Grad der Abweichung $\Delta(XN\&CI, XN)$ dieser Bedingungen. Feste Intervallbreite 0.00025.	147
Abbildung 5.11: Vergleich der Berechnungsweisen durch die Seurat Methode und die ursprüngliche von Nascimento und Foster (1997) verwendete Methode angrenzender Flächen (feste Intervallbreite: 0.01)	152
Abbildung 5.12: Ergebnisse <i>Experiment VIII</i> . Relative Häufigkeiten der Präferenz von exakt normalisationskompatibel korrigierten Beleuchtungswechseln vor natürlichen Beleuchtungswechseln in Abhängigkeit von der relativen Abweichung der Zapfenerregungsverhältnisse berechnet nach der Methode angrenzender Flächen (ΔCER , berechnet in Anlehnung an Nascimento und Foster (1997); feste Intervallbreite: 0.01).	153
Abbildung 5.13: Ergebnisse <i>Experiment VIII</i> . Relative Häufigkeit der Bevorzugung von exakt normalisationskompatiblen Beleuchtungswechseln vor natürlichen Beleuchtungswechseln in Relation zum Grad der Abweichung $\Delta(NAT, XN)$ dieser Bedingungen. Feste Intervallbreite 0.00025.	154
Abbildung 5.14: Ergebnisse <i>Experiment VIII</i> . Relative Häufigkeit der Bevorzugung von exakt normalisationskompatiblen und chromatizitäts-intensitäts korrigierten Beleuchtungswechseln vor exakt normalisationskompatiblen Beleuchtungswechseln, in Relation zum Grad der Abweichung $\Delta(XN\&CI, XN)$ dieser Bedingungen. Feste Intervallbreite 0.00025.	154

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Chromatische Statistiken der in <i>Experiment I</i> verwendeten Stimulusfarbensets. Wenn nur ein Wert angegeben ist, gilt dieser für alle drei Bedingungen.	69
Tabelle 3.2: Statistische Kennwerte zur Beschreibung der Stimulusfarbensets in <i>Experiment II</i> . Ist nur ein Wert angegeben, ist dieser für alle Bedingungen gültig.	79
Tabelle 3.3: Chromatische Kennwerte für die Stimulusfarbensets in <i>Experiment III</i> . Wenn nur ein Wert angegeben wird, gilt dieser für alle Bedingungen.	86
Tabelle 4.1: Eigenschaften der Stimulusfarbensets für <i>Experiment IV</i> und <i>V</i>	103
Tabelle 5.1: Gegenüberstellung der zentralen Eigenschaften der Versuchspläne und Versuchsaufbauten der drei <i>Experimente (VI, VII, VIII)</i>	127

I

Theoretischer Hintergrund

*„Für den Psychologen endlich ist das Grün weder eine Eigenschaft des Blattes, noch der Strahlung, noch der Regung des inneren Auges, sondern ein psychisches Phänomen, ein Bewusstseinsinhalt bestimmter Qualität.“
(Hering, 1920, S. 3)*

1. Grundlagen der Farbwahrnehmung

Farbige Objekte wie einen roten Ball, grünes Gras oder den blauen Himmel zu sehen, ist für uns eine intuitive alltägliche Erfahrung. Wir nehmen die Objekte unserer Außenwelt als farbig wahr, obwohl die Fähigkeit, Farben zu sehen, eine komplexe Leistung unseres Geistes ist. So ist unser Wahrnehmungseindruck von Farbe das Ergebnis einer konstruierenden interpretativen Leistung unseres Geistes, der weit über den Informationsgehalt des physikalischen Inputs hinausgeht. In unserem Erleben wird das Perzept Farbe der Außenwelt zugeordnet.

1.1 Zur Gliederung dieser Arbeit

In dieser Arbeit werden Fragen zur Wahrnehmung von Oberflächen- und Beleuchtungsfarben untersucht. Ausgangspunkt ist die Frage, wie es dem Wahrnehmungssystem gelingt, Oberflächenfarben, trotz einer Beleuchtungsveränderung und der damit einhergehenden Veränderung der vom Auge aufgenommenen Information, farblich konstant wahrzunehmen. Untersucht wird dabei die Fähigkeit des visuellen Systems chromatische Informationen über eine Zeitspanne hinweg zu analysieren, wobei sich die Untersuchungen auf zwei *Forschungsfragen* konzentrieren. Zum einen die Frage, welche chromatischen Regelmäßigkeiten visuelle System nutzt um einen farbkonstanten perzeptuellen Eindruck zu konstruieren. Zum anderen die Frage, welche Eigenschaften dieser zeitliche Analyseprozess hat. Eine dritte Fragestellung befasst sich mit der Erhebung direkter Urteile über einen Beleuchtungswechsel.

Die vorliegende Arbeit ist klassisch gegliedert. Zunächst erfolgt ein kurzer Überblick über die Grundlagen der Farbwahrnehmung (Kapitel 1), danach wird eine Einführung in die Thematik der Farbkonstanz im Hinblick auf die in dieser Arbeit untersuchten Fragestellungen gegeben (Kapitel 2) und die Fragestellungen und untersuchten Hypothesen vorgestellt (Kapitel 2.5). Im zweiten Teil der Arbeit befassen sich die Kapitel 3,

4, 5 mit den empirischen Untersuchungen der drei Fragestellungen und Kapitel 6 schließt die Arbeit mit einer zusammenfassenden Diskussion ab.

Bevor wir uns in diesem Kapitel dem Prozess der Farbwahrnehmung und damit den psychologischen Fragestellungen zuwenden, betrachten wir zunächst die relevanten physikalischen Gesetzmäßigkeiten unserer Außenwelt. Anschließend erweitern wir den Fokus und untersuchen die psychophysikalischen Eigenschaften von Farben. Dieses Kapitel kann nur einen schnellen Überblick über die physikalischen, psychophysikalischen und psychologischen Grundlagen der nachfolgenden Experimente geben, ausführliche Diskussionen und detaillierte Darstellungen physikalischer, psychophysikalischer, kolorimetrischer Grundlagen finden sich beispielsweise bei Wyszecki und Stiles (2000a) und Irtel (1991) und für psychologische Grundlagen bei Mausfeld (1998, 2003, 2011b).

1.2 Physikalische Beschreibung

Licht wird als sichtbare elektromagnetische Strahlung definiert und kann über seine spektrale Energieverteilung $e(\lambda)$, welche die relative Energie in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ angibt, beschrieben werden. Der sichtbare Bereich der elektromagnetischen Strahlung wird durch die Sensitivität der Photorezeptoren im menschlichen Auge bestimmt und befindet sich in etwa zwischen 380 und 760 nm¹. Die gesamte abgestrahlte Energie (E) ergibt sich als Integral über den sichtbaren Bereich² (Gleichung 1.1). Abbildung 1.1 zeigt mit $e_1(\lambda)$ ein Beispiel für die spektrale Energieverteilung eines Lichts. Solche, sich über einen breiten Bereich des sichtbaren Spektrums erstreckenden spektralen Energieverteilungen finden sich insbesondere bei Wärmestrahlern zu denen die natürliche Lichtquelle der Sonne oder auch Kerzenlicht zählen. Dem gegenüber stehen monochromatische Lichter, also Lichter, deren gesamte spektrale Energie aus Licht einer bestimmten Wellenlänge besteht und die im spektralen Energieverteilungsdiagramm als senkrechte Linie dargestellt werden³ (z. B.

¹ Die Angaben für die kurzwellige bzw. langwellige Grenze, also die absolut maximale Stelle, an der eine der drei Zapfensensitivitätsfunktionen den Nullpunkt erreicht bzw. wieder erreicht variiert in der Literatur. Richter (1981) sieht den Grund hierfür darin, dass die Grenzwellenlängen nicht exakt definierbar seien, Brainard und Stockman (2010) merken an, dass für viele psychophysikalische Fragestellungen eine Arbeit mit dem „Kernbereich“ zwischen 400 und 700 nm als hinreichend angesehen werde.

² vgl. Brainard (1995) für eine anschauliche Einführung in die in diesem Abschnitt beschriebenen physikalischen Grundlagen.

³ Da es durch technische Grenzen nicht eine einzelne Wellenlänge, sondern nur ein sehr schmaler Ausschnitt des Spektrums isoliert werden kann, wäre die korrekte Darstellung eines realisierten monochromatischen Lichts keine unendlich feine Linie, sondern ein schmaler Balken.

$e_m(\lambda)$ in Abbildung 1.1). Zwischen diesen beiden Extremen gibt es eine unbegrenzte Zahl von Mischformen.

$$E = \int_{380}^{760} e(\lambda) d\lambda \quad 1.1$$

Für die spektrale Beschreibung von Lichtern hat sich neben der Beschreibung als kontinuierliche Funktion auch eine Vektorschreibweise durchgesetzt. Einen Lichtvektor \mathbf{b} erhält man durch die diskrete Abtastung der spektralen Energieverteilungsfunktion in regelmäßigen Abständen $(\Delta\lambda)$, wobei die Messwerte an den Stützstellen $(1, \dots, i, \dots, n)$ den Lichtvektor \mathbf{b} ergeben (Gleichung 1.2).

$$\begin{aligned} b_i &= e(\lambda_0 + (i - 1) \Delta\lambda) \\ \mathbf{b} &= (b_1, \dots, b_n) \end{aligned} \quad 1.2$$

Gesamtenergie: $E \approx \Delta\lambda \sum_{i=1}^n b_i$

Intensitätsveränderung eines Lichtes. Verändert man die Lichtintensität eines Lichtes $e(\lambda)$ um ein Licht $e'(\lambda)$ zu erhalten, so entspricht dies mathematisch der Skalierung der spektralen Energieverteilung $e(\lambda)$ um einen bestimmten Faktor t (Gleichung 1.3, Abbildung 1.2).

$$e'(\lambda) = t e(\lambda) \quad 1.3$$

Additive Farbmischung. Mit dem Begriff additive Farbmischung wird die Mischung verschiedener Lichter beschrieben, wie sie beim übereinander Projizieren von Lichtern geschieht. Dabei entsteht ein Mischlicht $b(\lambda)$, das sich aus den Anteilen der Ausgangslichter $e_{1\dots k}(\lambda)$ zusammensetzt. Die numerische Operation zu diesem Überdecken der beiden Lichter ist die Addition der spektralen Energieverteilungen der gemischten Lichter (Abbildung 1.3). Mathematisch wird dies als Linearkombination der spektralen Energieverteilungen verschiedener Lichter beschrieben, wie Gleichung 1.4 exemplarisch dargestellt.

$$b(\lambda) = e_1(\lambda) + e_2(\lambda) + \dots + e_k(\lambda) \quad 1.4$$

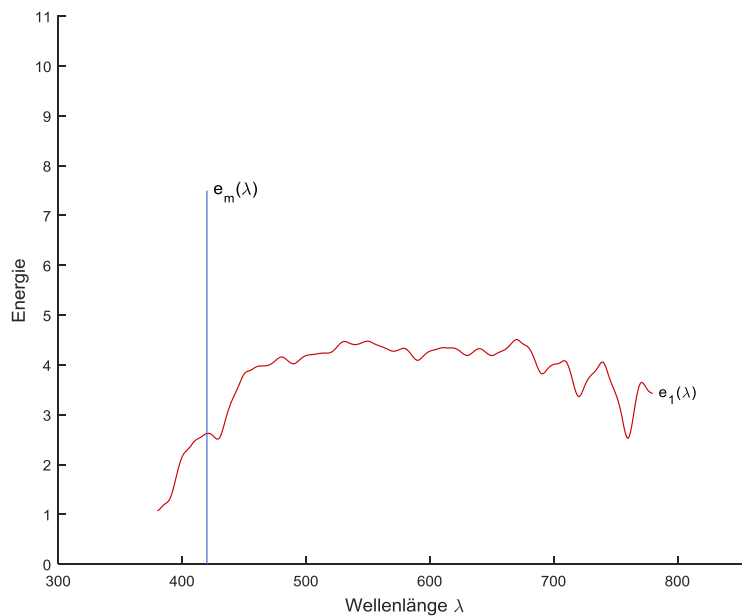


Abbildung 1.1: Beispiele für die elektromagnetischen Spektren zweier möglicher Lichter. Ein monochromatisches Licht $e_m(\lambda)$ (blau), das sich durch nur eine in seiner Energie von 0 verschiedenen Stelle im sichtbaren elektromagnetischen Spektrum auszeichnet. Die rote Funktion $e_1(\lambda)$ beschreibt die spektrale Energieverteilung von beispielsweise abendlichem Sonnenlicht (4500 K) über den sichtbaren Teil des elektromagnetischen Spektrums hinweg.

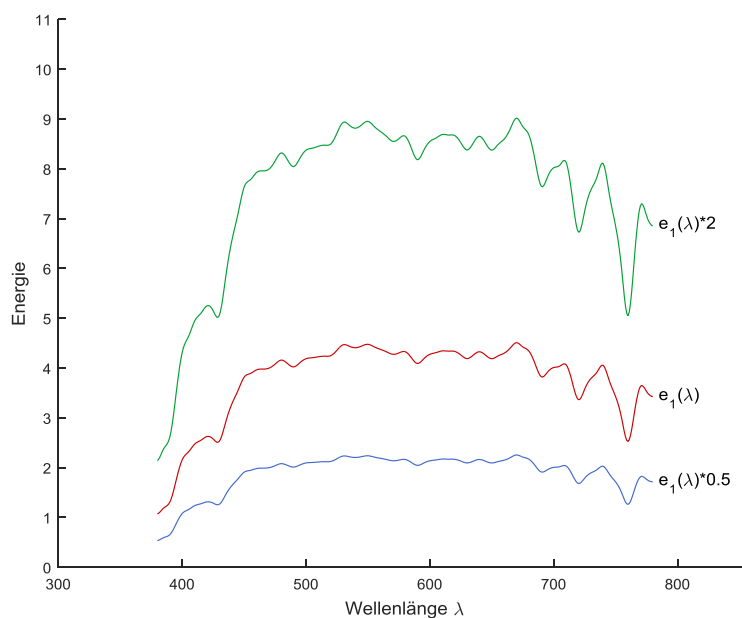


Abbildung 1.2: Intensitätsänderung eines Lichts. Ausgehend von der spektralen Energieverteilung von Sonnenlicht $e_1(\lambda)$ (●) werden die Auswirkungen einer Intensitätsverdoppelung (●) und einer Halbierung der Intensität (●) dargestellt.

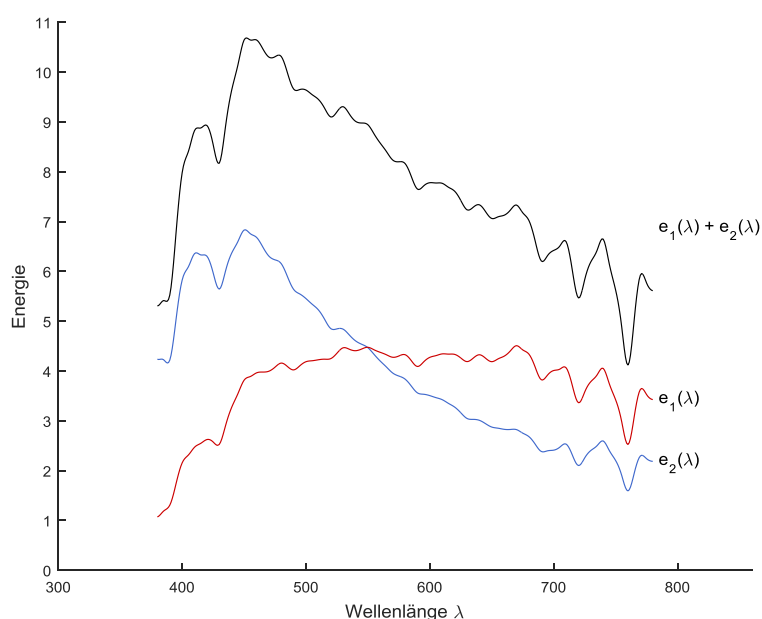


Abbildung 1.3: Additive Mischung zweier Lichter. Beispiel für die Mischung der Lichter $e_1(\lambda)$ (●) und $e_2(\lambda)$ (●), woraus sich das Mischlicht $e_1(\lambda) + e_2(\lambda)$ (●) ergibt.

1.3 Psychophysikalische Beschreibung

Trichromasie und Grassmann Gesetze. Ein klassisches Abgleichsexperiment⁴ stellt Versuchspersonen vor die Aufgabe ein farbiges Testlicht (b^{test}) mit Hilfe von drei verschiedenen Basislichtern, auch Primärlichter (P) genannt, nachzumischen, indem sie die Intensitäten (t) der drei Basislichter so lange verändern, bis der vorgegebene Testreiz und der nachgemischte Vergleichsreiz perzeptuell miteinander übereinstimmen. Mit der Wahl der perzeptuellen Gleichheit⁵ als relevanter Größe rückt eine psychophysikalische Größe in den Mittelpunkt der Betrachtung und verändert den Fokus

⁴ Der typische Versuchsaufbau besteht aus einem zweigeteilten kreisförmigen Infeld. In einem Halbkreis des Infeldes wird der Testreiz dargeboten, im anderen wird der Abgleich vorgenommen, indem die additive Mischung dreier Primärlichter so eingestellt wird, dass beide Infeldhälften gleich aussehen. Typischerweise wird für das Infeld eine Reizgröße von 2° (bzw. 10°) Sehwinkel gewählt, wobei dieser Inkreis von einem neutralen Umfeld mit konstanter Helligkeit (meist dunkel) umgeben wird. Die Abgleiche werden in einem ansonsten abgedunkelten Raum durchgeführt. Der Beobachter sitzt in angemessenem Abstand frontal zum Reiz und fokussiert ihn. Als Beobachter werden ausschließlich normalsichtige Versuchspersonen ausgewählt, die vor der Aufgabenbearbeitung eine Dunkeladaptation durchlaufen. Detaillierte Beschreibungen solcher Abgleichsexperimente finden sich in der Literatur (Richter, 1981; Wyszecki, 1960; Wyszecki & Stiles, 2000c).

⁵ Als Kriterium für perzeptuelle Gleichheit also dem „gleich aussehen“ wird häufig das Wegfallen der wahrgenommenen Trennlinie zwischen rechter und linker Infeldhälfte herangezogen (Irtel, 1991).

weg von rein physikalischen Beschreibungen der Außenwelt hin zur Betrachtung psychologischer Konstrukte. Für ein solches Abgleichsexperiment gibt es nur drei Bedingungen. Zum einen müssen die Basislichter unabhängig voneinander sein, ein Basislicht darf also nicht eine Kombination der beiden anderen sein, ansonsten können die Basislichter frei gewählt werden. Wenn das klassische Nachmischen nicht gelingt, ist es gestattet, eine sogenannte uneigentliche Farbmischung vorzunehmen. Das bedeutet, dass die Versuchsperson ein oder zwei Basislichter zum Testreiz mischt und mit den verbleibenden Basislichtern diesen modifizierten Testreiz nachmischt. Wird das Abgleichsexperiment in einer formalisierten Form dargestellt, so gehen die Intensitäten als Gewichte für die einzelnen Basislichter in die Gleichung ein (Gleichung 1.5). Findet eine uneigentliche Farbmischung statt, so geht die Intensität des zum Testreiz hinzugemischten Primärlichts mit einer negativen Gewichtung in die Gleichung ein. Gleichung 1.5 formalisiert das Abgleichsexperiment und verdeutlicht, dass ein Matchlicht ($\mathbf{b}^{Vergleich}$) welches aus einer anteiligen (t) Mischung dreier Primärlichter (\mathbf{P}) besteht, so eingestellt werden kann, dass es genauso aussieht wie das Testlicht (\mathbf{b}^{Test}). Diese perzeptuelle Gleichheit zweier Lichter, welche nicht auf denselben spektralen Energieverteilungen beruhen, wird *Metamerie* genannt und in der formalisierten Schreibweise durch \sim ausgedrückt. Metamere Reize⁶ sehen perzeptuell gleich aus, *können* jedoch physikalisch verschieden sein, wohingegen man zwei physikalisch identische Reize als *isomer* bezeichnet (Irtel, 1991).

$$\text{Trichromasie: } \mathbf{b}^{Vergleich} = t_1 \mathbf{P}_1 + t_2 \mathbf{P}_2 + t_3 \mathbf{P}_3 \sim \mathbf{b}^{Test} \quad 1.5$$

Wählt man aus dem gesamten sichtbaren Bereich des Spektrums in engen, regelmäßigen Abständen monochromatische Lichter bestimmter Wellenlänge als Testlichter aus und führt das Abgleichsexperiment für diese Lichter durch, so entsteht durch die Interpolation zwischen den eingestellten Intensitäten eines Basislichts für jedes Basislicht eine Funktion, die den Beitrag dieses Lichts in Abhängigkeit von der Wellenlänge beschreibt. Die drei so ermittelten Farbabgleichskurven werden als *Color Matching Functions (CMF)* bezeichnet.

Grassmann Gesetze. Das Grundprinzip der Trichromasie, dass es bei klassischen Abgleichsexperimenten normalfarbsichtigen Versuchspersonen möglich ist, jeden dargebotenen Farbreiz aus Licht mit Hilfe von drei voneinander unabhängigen Basislich-

⁶ Die hier vorgestellte Definition von Metamerie schließt physikalisch identische Reize als Teil der metameren Reize ein und folgt damit Irtels (1991) Argumentation, dass physikalisch identische Reize sehr wohl in einer Äquivalenzrelation zueinander stünden und aus einer physikalischen Gleichheit eine perzeptuelle Gleichheit folge. Dies ist hier zu betonen, da andere Autoren wie z. B. Richter (1981) isomere Reize explizit aus der Gruppe möglicher metameren Reize ausschließen.

tern nachzumischen (Wyszecki, 1960), formuliert Grassmann mathematisch als erstes Grassmannsches Gesetz, welches besagt, dass jede Farbe als Linearkombination dreier unabhängiger Primärlichter (Gleichung 1.5) darstellbar ist (Wyszecki, 1960). Als Erklärung hierfür vermutete schon Helmholtz (1867) eine physiologische Ursache, welche jedoch erst durch den Nachweis von drei Zapfen-Fotorezeptortypen im Auge in den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts (P. K. Brown & Wald, 1963, 1964) bestätigt werden konnte. Diese drei Zapfentypen unterscheiden sich in ihrer Sensitivität für bestimmte Abschnitte des Spektrums sichtbaren Lichts und werden gemäß ihren Sensitivitätsmaxima als langwelliger (*L*), mittelwelliger (*M*) und kurzwelliger (*S*) Zapfen bezeichnet. Dies ist ein gutes Beispiel für eine gelungene Verbindung zweier Untersuchungsperspektiven, der sinnesphysiologischen und der psychophysikalischen Forschung.

Der Mathematiker Hermann Grassmann beschäftigte sich intensiv mit der Newtonschen Theorie der Farbenmischung und betrachtete hierbei die Aussage, dass zu jeder Farbe eine Komplementärfarbe existiere, welche in ihrer Mischung weiß ergäben, näher und wies mit logischen Überlegungen nach, dass dieser Satz korrekt ist (Grassmann, 1902). Aus diesen Überlegungen gehen Sätze hervor, die allgemein als die Grassmannschen Gesetze bezeichnet werden und zentrale Eigenschaften des Gleichheitseindrucks von Farben beschreiben. Ausformulierte Varianten findet man bei Richter (1981) und Wyszecki (1960), eine formalisierte Zusammenfassung die auf der Arbeit von Krantz (1975) basiert, beispielsweise bei Brainard und Stockman (2010) oder Wyszecki und Stiles (2000c). Die Grassmannschen Gesetze präzisieren die allgemeine Aussagekraft der Trichromasie und ermöglichen es, präzise Vorhersagen über den zu erwartenden Gleichheitseindruck von Farben zu machen (Wyszecki & Stiles, 2000c). Die Grassmannschen Gesetze besagen, dass die Farbwahrnehmung tri-variant (1. Grassmannsches Gesetz), stetig (2. Grassmannsches Gesetz) und additiv und subtraktiv (3. Grassmannsches Gesetz) sei (Grassmann, 1902; Krantz, 1975). Jedoch sind die Grassmannschen Gesetze nicht uneingeschränkt anwendbar, sondern beziehen sich auf das Tagessehen (photopisches Sehen). Die folgende Zusammenfassung der Grassmannschen Gesetze ist im Wesentlichen an den Formulierungen von Brainard und Stockman (2010), Niederée (1998) und insbesondere Krantz (1975) orientiert.

Da die obige Metameriedefinition explizit isomere Reize als metamere Reize einschließt, lässt sich zunächst die einfachste Äquivalenzrelation (Krantz, 1975; Niederée, 1998) definieren, nämlich die der Reflexivität (Gleichung 1.6). Diese besagt, dass zwei isomere Lichter auch als metamer wahrgenommen werden (Grassmann, 1902; Krantz, 1975).

Reflexivität: $\mathbf{b}_1 \sim \mathbf{b}_1$

1.6

Unter Symmetrie (Gleichung 1.7) versteht man die zweite Äquivalenzrelation, die besagt, dass falls Licht \mathbf{b}_1 zu Licht \mathbf{b}_2 perzeptuell gleich ist, ist auch Licht \mathbf{b}_2 zu Licht \mathbf{b}_1 perzeptuell gleich.

Symmetrie: $\mathbf{b}_1 \sim \mathbf{b}_2 \Rightarrow \mathbf{b}_2 \sim \mathbf{b}_1$

1.7

Die dritte Äquivalenzrelation beschreibt die Transitivität der Reize (Gleichung 1.8), durch welche die bisherigen Überlegungen dahingehend erweitert werden, dass wenn Licht \mathbf{b}_1 zu Licht \mathbf{b}_2 metamer ist und Licht \mathbf{b}_2 zu Licht \mathbf{b}_3 ebenfalls metamer ist, folgt, dass auch die Lichter \mathbf{b}_1 und \mathbf{b}_3 perzeptuell gleichaussehend sein werden.

Transitivität: $\mathbf{b}_1 \sim \mathbf{b}_2 \text{ und } \mathbf{b}_2 \sim \mathbf{b}_3 \Rightarrow \mathbf{b}_1 \sim \mathbf{b}_3$

1.8

Streng genommen sind die unter dem Begriff Äquivalenzrelation zusammengefassten Regelmäßigkeiten nur implizit in Grassmanns Überlegungen vorhanden, werden von Krantz (1975) jedoch explizit herausgearbeitet. Zudem stellen diese Äquivalenzrelationen die Grundanforderungen an das Farbabgleichsparadigma dar. Das Proportionalitätsgesetz ist wiederum ein von Krantz entwickelter Ersatz für das zweite Grassmannsche Gesetz der Stetigkeit. Das Proportionalitätsgesetz (Gleichung 1.9) besagt, wenn die Lichter \mathbf{b}_1 und \mathbf{b}_2 metamer zueinander sind, dann werden sie dies auch nach einer Intensitätsänderung beider Lichter um den Faktor α bleiben.

Proportionalität: $\mathbf{b}_1 \sim \mathbf{b}_2 \Rightarrow \alpha \mathbf{b}_1 \sim \alpha \mathbf{b}_2$

1.9

Das Additivitätsgesetz ist eine Ableitung des dritten Grassmannschen Gesetzes. Dies besagt, dass zwei jeweils metamere Paare von Lichtern in ihren wechselseitigen Kombinationen wiederum metamer sind (Gleichung 1.10).

Additivität: $\mathbf{b}_1 \sim \mathbf{b}_2 \text{ und } \mathbf{b}_3 \sim \mathbf{b}_4 \Rightarrow \mathbf{b}_1 + \mathbf{b}_3 \sim \mathbf{b}_2 + \mathbf{b}_4$

1.10

Aus der Tatsache der Trichromasie ergibt sich die Schlussfolgerung, dass eine eindeutige Beschreibung eines Lichtes mit Hilfe der drei eingestellten Intensitäten der Basislichter, die häufig auch als Primärlichter bezeichnet werden, möglich ist. Zur eindeutigen Kodierung eines Farbstimulus können die relativen Intensitäten der drei beim Abgleich verwendeten Basislichter verwendet werden. Ein solches konkretes Tripel wird häufig als Tristimuluskoordinaten oder Farbvalenz bezeichnet. Um diese Tristimuluskoordinaten als optimale Repräsentation für Lichter verwenden zu können, müssen sie *eindeutig*, *persistent* und *beobachterunabhängig* sein (Brainard & Stock-

man, 2010). Ein Farbabgleich ist eindeutig, wenn nur eine mögliche Mischung der Primärlichter zu einem zum Testreiz metameren Ergebnis führt. In der Umkehrung ergibt sich daraus, dass alle metameren Lichter die gleichen Tristimuluskoordinaten erhalten. Ein Farbabgleich ist persistent, wenn die Gleichheit oder Ungleichheit von Lichtern auch bei Änderungen der Beobachtungsbedingungen erhalten bleibt. Unter der Änderung der Beobachtungsbedingungen verstehen Brainard und Stockman eine Änderung des das Infeld umgebenden Umfeldes sowie Änderungen in der Stimulusreihenfolge. Persistenz beschreibt somit die Stabilität der Farbabgleiche und erlaubt, dass dieselben Tristimuluskoordinaten über verschiedene Betrachtungsbedingungen hinweg verwendet werden können. Persistenz kann nur annähernd erreicht werden, als mögliche Einschränkungen der Persistenz sind Farbkonstanz und Kontextabhängigkeiten zu nennen (Brainard & Stockman, 2010). Die dritte Bedingung fordert, dass die Ergebnisse eines Farbabgleichsexperiments unabhängig vom Beobachter seien. Auch diese Bedingung wird für viele Personen als erreicht angesehen, wie Brainard und Stockman berichten.

Alle Lichter, die in der Abgleichssituation metamer zueinander sind, erhalten die gleichen Tristimuluskoordinaten, weshalb diese Koordinaten die Gleichheit bzw. Ungleichheit von Lichtern widerspiegeln. Somit wird eine Eigenschaft des Wahrnehmungssystems abgebildet, welche anhand spektraler Energieverteilungen als rein physikalischer Größe nicht zu erkennen wäre. Neben der Dimensionsreduktion im Vergleich zu Beschreibung über spektrale Energieverteilungen ermöglicht die Nutzung von Tristimuluskoordinaten vorherzusagen, ob zwei Lichter gleich aussehen. Da die Tristimuluskoordinaten die Intensitäten der Basislichter, mit denen die Farbabgleiche vorgenommen werden, direkt widerspiegeln, sind die Grassmannschen Gesetze ebenso auf die mit Hilfe von Tristimuluskoordinaten beschriebenen Lichter anzuwenden. Dies wird deutlich, wenn jeweils die Vektoren der Primärlichter in eine Matrix \mathbf{P} zusammenfasst werden und die dazugehörigen Tristimuluskoordinaten in einen Vektor \mathbf{t} . Dann lässt sich ein aus drei Primärlichtern gemischtes Vergleichslicht wie es in Gleichung 1.5 beschrieben wurde, wie in Gleichung 1.11 darstellen.

Trichromasie wie in Gleichung 1.5 dargestellt:

$$\mathbf{b}^{\text{Vergleich}} = t_1 \mathbf{P}_1 + t_2 \mathbf{P}_2 + t_3 \mathbf{P}_3 \sim \mathbf{b}^{\text{Test}} \quad 1.11$$

$$\mathbf{b}^{\text{Vergleich}} = \mathbf{P} \mathbf{t} \sim \mathbf{b}^{\text{Test}}$$

in Vektorschreibweise über alle Stützstellen (1 ... n):

$$\begin{pmatrix} b_1^{\text{Vergleich}} \\ \vdots \\ b_n^{\text{Vergleich}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & P_{n3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} b_1^{\text{Test}} \\ \vdots \\ b_n^{\text{Test}} \end{pmatrix}$$

Für das Proportionalitätsgesetz gilt damit (Gleichung 1.12):

$$\mathbf{b}_1 \sim \mathbf{b}_2 \Rightarrow \alpha \mathbf{b}_1 \sim \alpha \mathbf{b}_2 \text{ (siehe Gleichung 1.9)} \quad 1.12$$

$$\alpha \mathbf{b} \sim \alpha \mathbf{P}\mathbf{t} = \mathbf{P}(\alpha \mathbf{t})$$

Und schließlich für das Additivitätsgesetz (Gleichung 1.13):

$$\mathbf{b}_1 \sim \mathbf{b}_2 \text{ und } \mathbf{b}_3 \sim \mathbf{b}_4 \Rightarrow \mathbf{b}_1 + \mathbf{b}_3 \sim \mathbf{b}_2 + \mathbf{b}_4 \text{ (Gleichung 1.10)} \quad 1.13$$

$$\mathbf{b}_1 \sim \mathbf{P}\mathbf{t}_1 \text{ und } \mathbf{b}_2 \sim \mathbf{P}\mathbf{t}_2 \Rightarrow \mathbf{b}_1 + \mathbf{b}_2 \sim \mathbf{P}\mathbf{t}_1 + \mathbf{P}\mathbf{t}_2 = \mathbf{P}(\mathbf{t}_1 + \mathbf{t}_2)$$

Dies bedeutet, wenn die Tristimuluskoordinaten zweier Lichter bekannt sind, lassen sich die Tristimuluskoordinaten möglicher anderer, aus diesen beiden Lichtern erzeugten Mischlichter, vorhersagen, ohne dass die spektralen Energieverteilungen bekannt sein müssen. Kurz, dieselben Operationen, die auf Lichter anzuwenden sind, sind auch auf die Tristimulusvektoren anwendbar. Wie oben beschrieben lassen sich Color Matching Functions bestimmen, indem für in festen Abständen ausgewählte monochromatische Lichter jeweils ein Farbabgleich durchgeführt wird. So erhält man für jedes Basislicht einen Vektor, der die Lichtintensitäten an den verschiedenen Messpunkten enthält. Möchte man nun den Tristimulusvektor \mathbf{t} eines Lichtes \mathbf{b} bestimmen, so ergibt sich dieser aus Multiplikation der Color Matching Functions \mathbf{T} der festen Primärlichter mit dem Lichtvektor \mathbf{b} (Gleichung 1.14). Betrachtet man die Color Matching Functions als kontinuierliche Funktionen, so lassen sich die Tristimuluskoordinaten durch Gleichung 1.15 bestimmen. Üblicherweise liegen Color Matching Functions jedoch in diskreter Form vor (Gleichung 1.14): die Matrix \mathbf{T} ist eine $3 \times n$ Matrix, deren drei Spalten aus den n Werten der jeweiligen Color Matching Function bestehen. \mathbf{T}' bezeichnet die transponierte Matrix.

$$\mathbf{t} = \mathbf{T}'\mathbf{b} \quad 1.14$$

$$t_i = \int T_i(\lambda)b(\lambda)d\lambda, \text{ mit } i=1, 2, 3 \quad 1.15$$

Lineartransformationen der Color Matching Functions. Die Color Matching Functions eines Sets dreier spezifische Primärlichter können durch lineare Transformationen in Color Matching Functions anderer Primärlichter überführt werden. Diese Primärlichter können realisierbare Lichter sein oder imaginäre, physikalisch nicht realisierbare Lichter, wie die CIE⁷ XYZ⁸ Basislichter von 1931. Auch wenn reale Primärlichter

⁷ Commission Internationale d'Eclairage, Internationale Beleuchtungskommission.

⁸ Die CIE XYZ Color Matching Functions von 1931 wurden so gewählt, dass alle drei Funktionen nur positive Werte annehmen. Werden die Color Matching Functions als Koordinaten in einem Farbraum dargestellt, es entsteht also ein Linienzug, so ergibt sich zwangsläufig auch

optimal gewählt werden, werden immer einige Farbabgleiche nur durch Abgleiche zweiter Art möglich sein. Dies führt bei der Nutzung realer Primärlichter zu negativen Werten. Möchte man dies umgehen, so bietet sich die Wahl imaginärer Basislichter an. Hierzu werden die mit Hilfe der aus Abgleichsexperimenten mit realen Primärlichtern gewonnenen Daten mit Hilfe einer Lineartransformation in die Darstellung mit imaginären, also nicht realisierbaren Basislichtern überführt. Zudem ist es möglich, durch eine Lineartransformation die Color Matching Functions eines Sets dreier spezifischer Primärlichter in die Zapfensensitivitätsfunktionen zu überführen, wobei für die Zapfensensitivitätsfunktionen ebenfalls imaginäre Basislichter angenommen werden.

Farbräume. Als Farbräume bezeichnet man die dreidimensionale geometrische Repräsentation eines spezifischen Sets von drei Primärlichtern. Deren Color Matching Functions für monochromatische Lichter lassen sich als Linienzug in diesem, durch die Primärlichter aufgespannten Koordinatensystem darstellen. Eine spezifische Tristimuluskoordinate kann man sich als konkreten Ort in einem dreidimensionalen Farbraum vorstellen. Wenn die zum Nachmischen verwendeten Basislichter unabhängig voneinander sind, sich also nicht als Linearkombination auseinander ergeben, ist es naheliegend, die Intensitäten jedes Basislichts als Achse zu verwenden und diese orthogonal zueinander zu positionieren. Da die Zahl möglicher Kombinationen dreier Primärlichter sehr groß ist, ist somit auch die Anzahl möglicher Farbräume ebenso groß. Diese Farbräume unterscheiden sich nicht nur im Hinblick auf die konkrete Wahl der Primärlichter, deren Wahl bestimmt auch welche Eigenschaften durch sie

hier, dass auf Basis der gewählten imaginären Basislichter alle möglichen sichtbaren Farben durch positive Tristimuluskoordinaten darstellbar sind. Die Color Matching Functions wurden dabei so gewählt, dass die Y-Werte die spektrale Helligkeitsfunktion $V(\lambda)$ abbildet. Diese Funktion gibt den „spektralen Hellempfindlichkeitsgrad für das Tagessehen“ (Richter, 1981, S. 34) wieder und ist abhängig von der Bestrahlungsstärke und der Wellenlänge. Betrachtet man die auf diese Weise ermittelten Farbvektoren monochromatischer Lichter, so entsteht ein relativ kegelförmiger Körper, dessen Spitze im Koordinatenursprung des neuen Farbraums liegt und dessen Außenhülle durch die Farbvektoren monochromatischer Lichter definiert wird. Dieser Kegel wird häufig mit Schrödingers Wortschöpfung als Farbtüte (Richter, 1981) bezeichnet. Um Farben in einen zweidimensionalen Chromatizitätsdiagramm darzustellen, werden im nächsten Schritt Chromatizitätskoordinaten gewonnen, welche weitere Qualitäten von Farben beschreiben (Richter, 1981). Diese werden durch drei neue Quantitäten beschrieben, x , y , z . Hierzu wird in den XYZ-Farbraum eine Ebene so gelegt und die Tristimuluskoordinaten auf diese Ebene projiziert, sodass sich für diese Ebene die Chromatizitätskoordinaten zu 1 summieren. Dies wird durch die Relativierung an der Gesamtsumme erreicht: $x = \frac{x}{(x+y+z)}$, $y = \frac{y}{(x+y+z)}$, $z = \frac{z}{(x+y+z)}$. Da in der gewählten Schnittebene des Kegels die Summe von x , y , und z gleich eins ist ($x + y + z = 1$), sind nur zwei dieser Quantitäten unabhängig, weshalb es möglich ist, ein zweidimensionales Chromatizitätsdiagramm zu erzeugen.

repräsentiert werden. So beinhaltet der CIE XYZ Farbraum beispielsweise eine Repräsentation der Luminanz⁹, ein LMS-Farbraum hingegen ermöglicht es, Zapfenerregungen direkt abzulesen (vgl. Abschnitt 1.4). Eine kurze Einführung des in dieser Arbeit verwendeten und von MacLeod und Boynton entwickelten Farbraums (MacLeod & Boynton, 1979) findet sich in Abschnitt 1.4.1. Allen Farbräumen ist jedoch gemein, dass gleich aussehende Farben durch die gleichen Koordinaten repräsentiert werden. Den Koordinaten liegen Metamerierrelationen zu Grunde, die durch einen Beobachter festgelegt wurden. Alle Farbräume, deren Metamerierrelationen sich auf denselben Beobachter beziehen, können ineinander überführt werden (Brainard & Stockman, 2010). Viele der gängigen Farbräume beziehen sich auf einen sogenannten Standardbeobachter. Der *CIE 1931 standard colorimetric observer* ist ein hypothetischer Beobachter, dessen Farbgleichsdaten aus den gemittelten Daten mehrerer realer Beobachter besteht (Wyszecki & Stiles, 2000c).

1.4 Psychophysikalische und sinnesphysiologische Analogie

Eine Erklärung für Trichromasie und Metamerie auf physiologischer Ebene bietet die Dreifarbentheorie, welche auch als Young-Helmholtz-Theorie bekannt ist. Diese von Thomas Young entwickelte und von Hermann von Helmholtz¹⁰ aufgegriffene und erweiterte Theorie besagt, nach heutiger Formulierung, dass die Farbwahrnehmung auf drei Rezeptortypen beruht - welche wir heute als Zapfen bezeichnen - wobei beide Autoren noch keine konkreten Vorstellungen vom physiologischen Aufbau der Rezeptoren hatten. Oder wie Young es formulierte „now, as it is almost impossible to conceive each sensitive point of the retina to contain an infinite number of particles, each capable of vibrating in perfect unison with every possible undulation, it becomes necessary to suppose the number limited, for instance, to the three principal colours, red, yellow and blue” (Young, 1802 S. 20 f.). Helmholtz greift diesen Punkt auf und bezeichnet die Partikel als drei Arten von Nervenfasern (Helmholtz, 1867) und verweist nach ausführlichen Überlegung zur Mischung von Lichtfarben auf die Wahl dreier anderer Grundfarben, Violett, Rot und Grün. Diese Wahl, die er selbst auch kritisch diskutiert, präferiert er, da sich die Fläche, welche sich zwischen diesen drei

⁹ Luminanz, auch Leuchtdichte genannt, ist eine photometrische Größe, welche die Strahldichte (*radiance*) $L_{e,\lambda}$ mit dem spektralen Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ gewichtet:

$Luminanz_V = k_m \int_{\lambda} L_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda$, wobei k_m eine Konstante ist, die Lumen mit Watt in Verbindung setzt (Irtel, 1991; Lennie, Pokorny, & Smith, 1993). Gilchrist (2006) gibt eine vereinfachte Beschreibung der Luminanz als physikalische Lichtmenge, die einen Punkt von einem vorgegebenen optischen Bereich aus erreicht.

¹⁰ Young und Helmholtz leisten eine prägnante und weitreichende Formulierung, jedoch weisen aktuelle Zusammenfassungen darauf hin, dass sich auch schon in früheren Quellen die Kernidee dieser Hypothese findet (Richter, 1981).

Primärlichtern ergibt, größer ist als die zwischen den von Young vorgeschlagenen Farben (Helmholtz, 1867). Die zentrale Erweiterung von Youngs Theorie, wie sie auch von Wyszecki und Stiles (2000c) betont wird, ist die Idee, dass „objectives homogenes Licht erregt diese drei Arten von Fasern je nach seiner Wellenlänge in verschiedener Stärke“ (Helmholtz, 1867, S. 291). Damit propagiert Helmholtz, dass Licht alle drei Rezeptortypen erregt, der Grad der Erregung sich jedoch zwischen den Rezeptortypen in Abhängigkeit vom Lichtreiz unterscheidet. Weitergehend schlägt Helmholtz für die drei Rezeptortypen jeweils relativ breite Sensitivitätsspektren vor, wobei er die Sensitivitätsmaxima der drei Rezeptoren einmal im kurzwelligen, mittelwelligen und für den dritten Rezeptortyp im langwelligen Bereich vermutet. Die ersten Schätzungen der spektralen Sensitivitätskurven finden sich bei König und Dieterici (1892), Details zur Schätzung der Zapfensensitivitäten finden sich bei Wyszecki und Stiles (2000a).

Das Rezeptormodell, steht in einer mechanistisch elementaristischen Erklärungstradition da es die relative Erregung der drei Zapfen-Fotorezeptoren für den Farbeindruck verantwortlich macht (vgl. Abschnitt 1.6.1 sowie Mausfeld (1998)). Die dahinter stehende Idee zur Erklärung von Metamerie ist, dass zwei Lichter metamer erscheinen, wenn sie die gleichen Zapfenerregungen verursachen¹¹. Die Erregung eines Zapfens ergibt sich aus der spektralen Sensitivität dieses Zapfens dargestellt in der Zapfensensitivitätsfunktion für den insbesondere für kurzwelliges ($s(\lambda)$), mittelwelliges ($m(\lambda)$) und langwelliges ($l(\lambda)$) Licht sensitiven Zapfen und den Eigenschaften des ins Auge fallenden Lichts ($e(\lambda)$). Da die Sensitivität eines Zapfens in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Lichts variiert, kommt es so zu einer Gewichtung des Lichts in Abhängigkeit von der Wellenlänge.

Diese Gewichtung wird mathematisch durch die punktweise Multiplikation des Vektors des ins Auge fallenden Lichtes mit jeder der drei Zapfensensitivitätsvektoren umgesetzt. Die Gesamterregung ergibt sich aus dem Integral über die mit der Zapfensensitivitätsfunktion des jeweiligen Zapfens gewichteten spektralen Energieverteilung des ins Auge fallenden Lichts (Gleichung 1.16) bzw. durch Aufsummieren des jeweiligen sensitivitätsgewichteten Lichtvektors. Die in dieser Arbeit verwendeten Zapfensensitivitätsfunktionen stammen von Stockman, MacLeod und Johnson (1993) und sind in Abbildung 1.4 dargestellt. Diese wurden aus Farbabgleichsdaten geschätzt¹². Es

¹¹ Univarianzprinzip

¹² Stockman et al. (1993) arbeiteten mit normalfarbsichtigen Trichromaten sowie mit protanopen und deutanopen Versuchspersonen. Diese Versuchspersonen haben in der Fovea in einem Umkreis von 2° Sehwinkel keine funktionstüchtigen M- oder keine funktionstüchtigen

wird deutlich, dass sich die Sensitivitätsspektren für den M- und L-Zapfen stark überlappen, die Maxima der Kurven liegen bei ca. 440 nm, 550 nm und 570 nm. Die Zapfensensitivitätsfunktionen wurden darüber hinaus häufig so normiert, dass die Sensitivität eines Zapfens zwischen 0 und 1 liegt.

$$\begin{aligned} L &= \int e(\lambda)l(\lambda)d\lambda \\ M &= \int e(\lambda)m(\lambda)d\lambda \\ S &= \int e(\lambda)s(\lambda)d\lambda \end{aligned} \quad 1.16$$

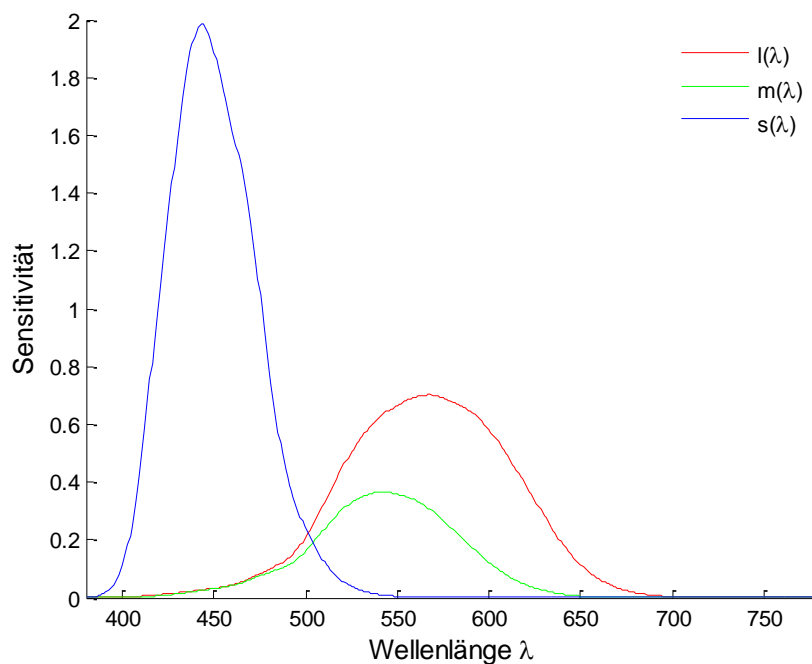


Abbildung 1.4: Zapfensensitivitätsfunktionen für den kurzwellig sensitiven ($s(\lambda)$), den mittelwellig sensitiven ($m(\lambda)$) und den langwellig sensitiven Zapfen ($l(\lambda)$) im 2° Abgleichs-paradigma nach Stockman et al. (1993)

1.4.1 Das MacLeod-Boynton Chromatizitätsdiagramm

Wie in Abschnitt 1.3 über Lineartransformationen für Color Matching Functions erwähnt, lässt sich ein aus Farbabgleichsexperimenten ermittelter Farbraum in einen dreidimensionalen Farbraum transformieren, dessen Achsen die Zapfenerregungen abbilden. Ein solcher L,M,S-Farbraum bildet somit die im proximalen Reiz enthalte-

L-Zapfen. Dadurch wird das Ermitteln der Sensitivitätsspektren für den jeweils funktionierenden L- bzw. M-Zapfen möglich.

nen Farb- und Helligkeitsinformationen in direkter Form ab. Hier ist es möglich die Zapfensensitivitätsfunktionen als Linienzug in diesen Farbraum einzuzichnen (Brainard & Stockman, 2010). Für jede Chromatizität lässt sich ein Farbvektor bestimmen, dessen Länge als Maß für die Intensität dieser Farbe gelten kann. MacLeod und Boynton (1979) leiteten aus diesem Farbraum ein Chromatizitätsdiagramm ab. Hierbei machten sie sich den Befund zunutze, dass nur die mittel und langwelligsensitiven Zapfen zur Luminanz (Gleichung 1.17) beitragen (Smith & Pokorny, 1975). Somit sind Ebenen, in denen die Summe aus L und M Zapfenerregungen konstant ist, äquiluminant (MacLeod & Boynton, 1979). Die Ebene $L + M = 1$ wird als Schnittebene für das Chromatizitätsdiagramm gewählt. Zur Beschreibung der im Chromatizitätsdiagramm (Abbildung 1.5) liegenden Koordinaten, werden die l -Achse und die s -Achse etabliert. Die Zapfenerregungen des L -Zapfens sind proportional zur Ausprägung der l -Achse, die Zapfenerregungen des M -Zapfens ergeben sich konstruktionsbedingt durch $1 - l$ (Gleichung 1.18). Die S -Zapfenerregung ist nicht in der l -Achse repräsentiert und damit unabhängig von dieser Achse des Chromatizitätsdiagramms. Vielmehr sind die S -Zapfenerregungen in Luminanz skaliert (Gleichung 1.19) durch die s -Achse im Chromatizitätsdiagramm repräsentiert (MacLeod & Boynton, 1979). Die Unabhängigkeit der beiden Achsen wird auch in ihrer orthogonalen Positionierung deutlich. Abbildung 1.5 zeigt ein Beispiel für ein solches Chromatizitätsdiagramm, ein Beispiel für eine Ausfärbung findet sich bei Cao, Pokorny und Smith (2005)¹³. Als inhaltliche Brücke kann man sich vorstellen, wenn zwei Farbreize miteinander verglichen werden, die beide gleichzeitig in der exakt gleichen Beobachtungssituation dargeboten werden, dann wird der Farbreiz als rötlicher (und damit weniger grünlich) wahrgenommen werden, der den höheren l -Wert hat. Analog gilt, wenn zwei Farbreize miteinander verglichen werden, die beide gleichzeitig in der exakt gleichen Beobachtungssituation dargeboten werden, dann wird der Farbreiz als bläulicher (und damit weniger gelblich) wahrgenommen werden, der den höheren s -Wert hat.

$$Luminanz = L + M \quad 1.17$$

$$l = \frac{L}{(L + M)} \quad 1.18$$

$$m = \frac{M}{L + M} = 1 - \frac{L}{(L + M)} = 1 - l$$

$$s = \frac{S}{(L + M)} \quad 1.19$$

¹³ Cao et al. (2005) verwenden andere Schätzungen für die Zapfensensitivitätsfunktionen als in der hier vorliegenden Arbeit verwendet werden, dennoch können die von Cao et al. präsentierten Farbkategoriebereiche als Näherung verstanden werden.

Durch diese Art der Konstruktion entstehen laut MacLeod und Boynton (1979) verschiedene Vorteile. Zum werden die Zapfenerregungen direkt repräsentiert und mit voneinander unabhängigen Koordinaten präsentiert. Aus der Tatsache, dass das Chromatizitätsdiagramm auf einer äquiluminanten Schnittebene beruht, folgern MacLeod und Boynton, dass gleichgroße Schritte im Chromatizitätsdiagramm auch als gleich große Schritte im LMS-Raum abgebildet werden können. Als letzten Vorteil nennen die beiden Autoren, dass Newtons *Center of Gravity Rule*, bzw. die Schwerpunktkonstruktion¹⁴ direkt anwendbar ist.

Das von MacLeod und Boynton (1979) vorgestellte Chromatizitätsdiagramm (MLB) wird in den Experimentalteilen dieser Arbeit zur Beschreibung der Stimuli und der Ergebnisse verwendet. Jedoch weicht die in dieser Arbeit verwendete Notation von der von MacLeod und Boynton verwendeten ab und folgt stattdessen der von Golz und MacLeod (2003) bzw. Smith und Pokorny (1996). In der von Golz und MacLeod vorgestellten Variante des MacLeod-Boynton Chromatizitätsdiagramms werden die Zapfensensitivitätsfunktionen von Stockman et al. (1993) zu Grunde gelegt, wodurch der Weißpunkt im Chromatizitätsdiagramm bei $I = 0.7$ (Golz & MacLeod, 2003), $s = 1.1466$ verortet wird. Weitere detaillierte Informationen zur Konstruktion des MacLeod-Boynton Farbraums finden sich neben der Originalpublikation auch bei Smith und Pokorny (1996).

¹⁴ Eine von Newton entwickelte Metrik zur Darstellung von Tristimuluskoordinaten, die hier nach einer Beschreibung von Richter (1981) wiedergegeben wird und als Analogie zur Funktion einer Waage vorstellbar ist. Hierbei stellt man sich eine masselose Ebene vor, wobei jedem Primärlicht ein Punkt auf der Ebene zugeordnet wird. Nehmen wir nun an, dass senkrecht zu dieser Ebene gelagerte Gewichte, die Lichtintensität des Primärlichts widerspiegeln, dann gibt der Punkt, an dem diese Ebene im Gleichgewicht ist, den Schwerpunkt wieder. Dieser lässt sich durch das Hebelgesetz berechnen und kann als Chromatizitätskoordinate interpretiert werden.

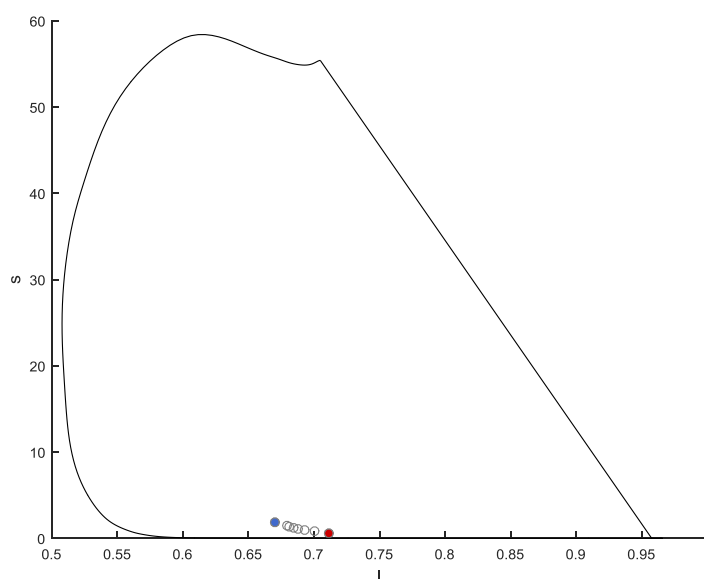


Abbildung 1.5: MacLeod-Boynton Chromatizitätsdiagramm. Spektraler Linienzug (schwarz) und natürliche Beleuchtungen \circ zwischen 4000 Kelvin \bullet und 20000 Kelvin \bullet im MacLeod-Boynton Chromatizitätsdiagramm, unter Verwendung der Zapfensensitivitätsfunktionen von Stockman et al. (1993).

1.5 Natürliche Lichtquellen und Oberflächen

Relative spektrale Energieverteilung natürlichen Lichts. Unter natürlichem Licht versteht man Sonnenlicht. Die relativen spektralen Energieverteilungen¹⁵, welche bei Licht aus natürlichen Lichtquellen, aber auch beispielsweise bei Kerzenlicht, auftreten werden oftmals auch als „gutmütig“ bezeichnet, da sie sich - wie für Licht aus Wärmestrahlern typisch - über einen breiten Bereich des sichtbaren elektromagnetischen Spektrums erstrecken. Die spezifische Ausprägung der relativen spektralen Energieverteilung natürlichen Lichts differiert in Abhängigkeit vom betrachteten Ausschnitt des Himmels. So unterscheiden sich die spektralen Energieverteilungen von direktem Sonnenlicht und des Lichtes bei klarem Nordhimmel deutlich. Abbildung 1.6 zeigt ein Diagramm der spektralen Energieverteilungen natürlichen Lichts, wie sie von der *CIE*¹⁶ beschrieben werden. Zur einfachen Beschreibung der spektralen

¹⁵ Wird die spektrale Energieverteilung normiert, indem man die Energie an einem bestimmten Punkt der Verteilung auf einen Wert fixiert (häufig wird 560nm gewählt) und den Rest der spektralen Energieverteilung dazu skaliert, ergibt sich eine relative spektrale Energieverteilung (Richter, 1981).

¹⁶ Commission International d' Eclairage, Internationale Beleuchtungskommission

Energieverteilungen werden korrelierte Farbtemperaturen¹⁷ verwendet. Wyszecki und Stiles (2000b) nennen drei systematische Ordnungsgruppen natürlicher Lichter. Tageslicht, das sich aus direktem Sonnenlicht und Himmelslicht zusammensetzt und auf eine horizontale Oberfläche fällt, hat unabhängig vom Grad der Bewölkung eine korrelierte Farbtemperatur zwischen 5000 Kelvin und 7000 Kelvin. Licht eines komplett bewölkten Himmels fällt ebenfalls in diesen Bereich, dessen Lichter zur ersten Gruppe zusammengefasst werden. Nördliches Himmelslicht oder Himmelslicht bei bedeckter Sonne hingegen, hat eine korrelierte Farbtemperatur von mehr als 7000 Kelvin, wobei der Grad der Bewölkung die korrelierte Farbtemperatur zu moderieren scheint. Bei unbedecktem Nordhimmel kann die korrelierte Farbtemperatur über 40000 Kelvin betragen. Als dritte Gruppe mit einer systematischen Gemeinsamkeit nennen Wyszecki und Stiles, direktes Sonnenlicht und Tageslicht bei niedrig stehender Sonne in Kombination mit Himmelslicht, welche eine Farbtemperatur von weniger als 5000 Kelvin haben. In diese dritte Gruppe gehören also neben direktem Sonnenlicht auch die Beleuchtungen in den Morgen- und Abendstunden¹⁸.

¹⁷ Korrelierte Farbtemperaturen beziehen sich auf die Temperatur eines Planckschen Strahlers. Ein Planckscher Strahler ist ein Hohlkörper, dessen spektrale Energieverteilung bei einer bestimmten Temperatur mit Hilfe des Planckschen Strahlungsgesetzes bestimmt werden kann. Als Farbtemperatur eines natürlichen Lichts wird die Temperatur des Planckschen Strahlers zugeordnet, bei der zwischen dem Licht der natürlichen Lichtquelle und dem vom Planckschen Strahler abgegebenen Licht Farbgleichheit besteht. Detaillierte Informationen finden sich z. b. bei (Richter, 1981; Wyszecki & Stiles, 2000c)

¹⁸ Lichter aus diesen drei Gruppen werden oftmals als neutrale Beleuchtung (Gruppe 1), bläuliche Beleuchtung (Gruppe 2) und rötliche Beleuchtung (Gruppe 3) bezeichnet. Sprachlich wird hiermit zwar eine perzeptuelle Eigenschaft zur Beschreibung einer physikalischen Eigenschaft der Außenwelt verwendet, diese sprachliche Ungenauigkeit wird jedoch in Kauf genommen, um eine kurze und prägnante Beschreibung zu ermöglichen.

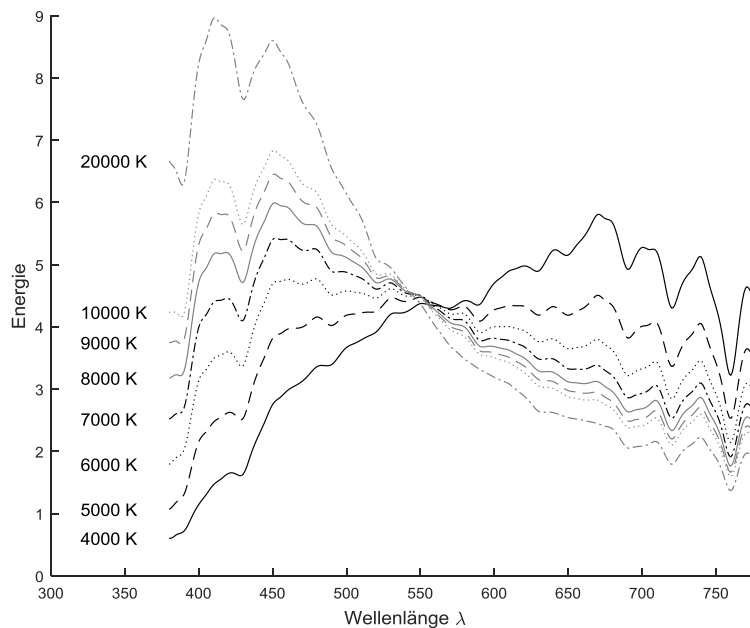


Abbildung 1.6: Relative spektrale Energieverteilungen natürlicher Lichter mit einer korrelierten Farbtemperatur zwischen 4000 Kelvin und 20000 Kelvin, die repräsentativ für verschiedene natürliche Lichtsituationen sind.

Licht und Oberflächen. Fällt Licht aus einer beliebigen Lichtquelle auf eine Oberfläche¹⁹, wird ein Teil des Lichts von der Oberfläche reflektiert und fällt ins Auge. Dieses remittierte Licht bezeichnet man als Farbsignal $C(\lambda)$ („color signal“ (Brainard, 2004)). Die spektrale Energieverteilung des Farbsignals $C(\lambda)$ wird durch die spektrale Reflektanzfunktion²⁰ der Oberfläche $r(\lambda)$, welche durch die Beschaffenheit der Oberfläche determiniert wird, und den Eigenschaften des auf diese Oberfläche fallenden Lichts $e(\lambda)$ bestimmt²¹ (Abbildung 1.7). Physikalisch und psychophysikalisch werden direkt ins Auge fallende Lichter und Farbsignale gleich behandelt. Der Vektor des Farbsignals lässt sich durch die punktweise Multiplikation des Vektors der Oberflächenreflektanzen mit dem Vektor des darauf fallenden Lichts, berechnen. Die Funktion zur

¹⁹ Oberfläche wird in dieser Arbeit immer im Sinne einer zusammenhängenden Fläche mit einer spezifischen Reflektanzfunktion und einer einheitlichen räumlichen Ausrichtung verstanden. Das Spielfeld eines Schachbretts wäre somit eine Fläche aus 64 Oberflächen und auch die Fläche einer Kugel würde nicht als eine Oberfläche betrachtet werden, da das von ihr reflektierte Licht in Abhängigkeit von der räumlichen Ausrichtung zur Lichtquelle und zum Beobachter variiert. Eine Oberfläche kann somit immer durch ein einziges Farbsignal repräsentiert werden.

²⁰ Da in dieser Arbeit mit gleichmäßig ausgeleuchteten Oberflächen gearbeitet wird, werden die Begriffe Remission und Reflektanz synonym verwendet.

²¹ $C(\lambda) = r(\lambda) \cdot e(\lambda)$

Berechnung der Zapfenerregung (Gleichung 1.16) wird somit um den Faktor $r(\lambda)$ erweitert, der die Oberfläche repräsentiert (Gleichung 1.20).

$$\begin{aligned} L &= \int r(\lambda) e(\lambda) l(\lambda) d\lambda \\ M &= \int r(\lambda) e(\lambda) m(\lambda) d\lambda \\ S &= \int r(\lambda) e(\lambda) s(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad 1.20$$

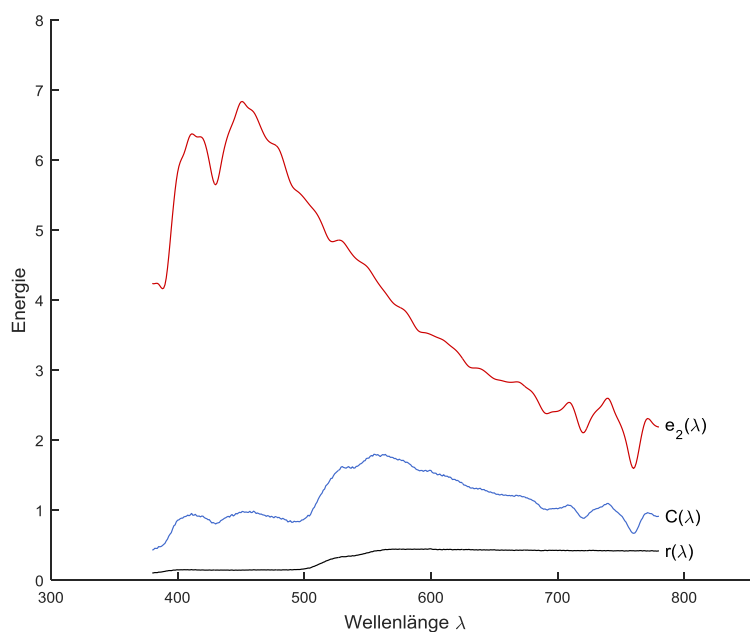


Abbildung 1.7: Beispiel für ein von einer Oberfläche reflektiertes Farbsignal $C(\lambda)$. $r(\lambda)$ beschreibt die spektrale Oberflächenreflektanzfunktion für die Oberfläche eines gelblich wirkenden Munsell-Chips (2.5 Y 7/6) (Hiltunen, n.d.), auf die die Beleuchtung $e_2(\lambda)$ fällt.

1.6 Farbwahrnehmung aus psychologischer Perspektive

Die Beschäftigung mit Fragestellungen der Farbwahrnehmung hat in der wahrnehmungspsychologischen Forschung eine lange Tradition. Dementsprechend wurde eine große Zahl unterschiedlicher Theorien, Modelle und Befunde hervorgebracht. Diese lassen sich auf theoretischer Ebene zwar theoretischen Perspektiven grob zuordnen, dennoch können sich verschiedene Ansätze innerhalb einer theoretischen Perspektive widersprechen oder Elemente verschiedener theoretischer Perspektiven aufnehmen. Im Hinblick auf die Farbwahrnehmungsforschung unterscheidet Mausfeld

(1998) zwei vorherrschende theoretische Perspektiven, die streng elementaristisch-psychophysikalische Perspektive und die funktionale Perspektive. Mausfeld definiert als Kriterium zur Beurteilung der Güte einer Theorie, deren Beitrag zur Beantwortung der Frage mit Hilfe welcher Prinzipien das Wahrnehmungssystem einen bedeutungsvollen Output bei einem gegebenen physikalischen Input generiert (Mausfeld, 2011a, 2011b, 2005).

1.6.1 Elementaristische Perspektive

Die elementaristische Theorieperspektive ist historisch vom Empirismus beeinflusst (Mausfeld, 2005), einer philosophischen Strömung, welche die Sinneswahrnehmung als einzige Informationsquelle ansieht und sich strikt gegen das apriorische Vorhandensein komplexer Konzepte im menschlichen Geist wendet und stattdessen annimmt, dass diese erworben werden müssen (Mausfeld, 2005). Die elementaristische Theorieperspektive fokussiert sich auf den Umgang unseres visuellen Systems mit Reizen der Außenwelt und rückt elementare psychophysikalische Konzepte wie den Farbabgleich, die Farbunterscheidung oder neurophysiologische Konzepte wie die sensorische Transduktion in den Mittelpunkt (Mausfeld, 1998). Üblicherweise wird zur Klärung elementaristischer Fragestellungen mit isolierten, kontextfreien Stimuli gearbeitet, die sich mit einfachen physikalischen Größen beschreiben lassen (Mausfeld, 1998). Die elementaristische Perspektive hat zentrale Einsichten ermöglicht, zu denen die Young-Helmholtz-Theorie (vgl. Abschnitt 1.4), die Heringsche Gegenfarbentheorie sowie die Grassmann Gesetze (vgl. Abschnitt 1.3) gehören. Diese grundlegenden Einsichten sind zentrale Elemente weiterer Theorien zur Farbwahrnehmung, selbst wenn diese nicht in der elementaristischen Forschungstradition stehen (Mausfeld, 1998), und somit nicht von zu unterschätzendem Wert.

Der elementaristischen Theorieperspektive, die sich intensiv mit elementaren Kodierungen lokaler und einfacher Lichtreize beschäftigt und die sich damit stark auf den Reiz fokussiert, stellt die Gestaltpsychologie einen völlig anderen Blickwinkel entgegen. So fokussiert sich die Gestaltpsychologie auf das Ganze, von dem sie ausgeht, dass es mehr als der sensorische Input ist und die somit internen Organisationsprinzipien eine wichtige Rolle im Wahrnehmungsprozess zuordnet (Mausfeld, 2005). Dies bedeutet, dass die Gestaltpsychologie davon ausgeht, dass nicht alle Informationen im Reiz enthalten sind, sondern auf Basis einer aktiven bedeutungsgenerierenden Leistung des Wahrnehmungssystems entstehen (Mausfeld, 2005). Die Gestaltpsychologie stellte also durchaus funktionale Überlegungen an, jedoch traten diese - wie Mausfeld zusammenfasst - gegenüber den Überlegungen zur Gestaltbildung aus dem Reiz, in den Hintergrund.

1.6.2 Funktionalistische Theorieperspektive

Die funktionale oder funktionalistische Theorieperspektive rückt komplexe Leistungen des visuellen Systems in den Fokus des Interesses. Von diesen ausgehend werden Überlegungen zur Theoriebildung angestellt (Mausfeld, 1998). Zu solchen komplexen Leistungen gehören komplexe perzeptuelle Fähigkeiten wie die Wahrnehmung von Glanz, Schatten, Transparenz, Farbkonstanz, Oberflächenfarbe oder Beleuchtung (Mausfeld, 1998). Zur Untersuchung diesbezüglicher Fragestellungen müssen im Vergleich zur Untersuchung elementaristischer Fragestellungen deutlich komplexere Szenen gewählt werden (Mausfeld, 1998). Die funktionale Theorieperspektive umfasst dabei zahlreiche Teilfelder, zu denen Brunswiks probabilistischer Funktionalismus, Gibsons ökologisch-funktionalistische Perspektive oder der computationale Ansatz zählen (Mausfeld, 1998, 2005), wobei der computationale Ansatz zu den einflussreichsten Ansätzen in der Farbwahrnehmungsforschung der letzten Jahrzehnte zählt. Daher werden die Kernideen dieses Ansatzes im Folgenden kurz vorgestellt.

1.6.2.1 Computationaler Ansatz

Der computationale Ansatz stellt funktionale Prozesse in den Mittelpunkt. Er sieht Wahrnehmungsprozesse als Prozesse der Informationsverarbeitung bzw. im Sinne einer Computermethapher als Prozesse der Datenverarbeitung. Brainard und Maloney (2011) betonen, dass die Algorithmen, welche in computationalen Modellen zur Schätzung der Ergebnisgröße verwendet werden, nicht oder nicht direkt in Zusammenhang mit Prozessen der menschlichen Farbwahrnehmung stehen oder diese beschreiben. In dieser Kernformulierung ist der computationale Ansatz zunächst neutral, wie Mausfeld jedoch betont, wird Modellen, die mit dem computationalen Ansatz arbeiten, oftmals implizit eine theoretische Idee zugeordnet (Mausfeld, 2005).

1.6.3 Interdisziplinäre integrative Perspektive

Die integrative Theorieperspektive entsteht durch Kumulation und Konvergenz des Wissens verschiedener kognitionswissenschaftlicher Disziplinen wie der Wahrnehmungspsychologie, der Ethologie, der vergleichenden Wahrnehmungsforschung, der Kognitionsforschung und der Säuglingsforschung (Mausfeld, 2011b). Diese integrative Theorieperspektive hält Mausfeld in Bezug auf die Lösung der eingangs skizzierten Frage mit Hilfe welcher Prinzipien das Wahrnehmungssystem arbeitet für erfolgversprechend, auch wenn zu diesem Zeitpunkt noch keine umfassende, detaillierte Form des Modells zur Verfügung steht.

An dieser Stelle soll nur eine kurze Zusammenfassung gegeben werden, eine detaillierte Darstellung ist bei Mausfeld (2011a, 2011b) finden, wobei sich auch die hier folgende Darstellung auf diese Arbeiten stützt. Die Architektur des Wahrnehmungssystems lässt sich gemäß dieser integrativen Theorieperspektive im Hinblick auf ihre

Aufgaben bzw. ihre interne Funktion in ein sensorisches und ein perzeptuelles Subsystem teilen, wobei der Output des perzeptuellen Systems wiederum höheren, beispielsweise interpretativen Systemen zur Verfügung steht (Mausfeld, 2011a, 2011b). Sensorischer Input, der sich physikalisch als räumliches Energiemuster beschreiben lässt, wird von für diesen Input sensitiven Sinneskanälen aufgenommen. Die Aufgabe des sensorischen Systems ist nun die Transduktion der physikalischen Energie in neuronalen Code sowie dessen Rekodierung und Vorverarbeitung, mit dem Ziel, eine Kodierung zu erreichen, die vom perzeptuellen System verarbeitet werden kann (Mausfeld, 2011a, 2011b). Der sensorische Code, wie Mausfeld den Output des sensorischen Systems bezeichnet, ist vollständig durch die aus dem sensorischen Input extrahierten Informationen beschreibbar, muss in seiner Kodierungsform jedoch keine Ähnlichkeit mit dem sensorischen Input haben. Zudem erfüllt er zwei Funktionen: zum einen enthält er konkrete Werte, also Informationen, zum anderen dient er als Trigger zur Aktivierung von im perzeptuellen System enthaltenen Konzepten (Mausfeld, 2011a, 2011b).

Das perzeptuelle System beinhaltet laut Mausfeld (2011a) eine Anzahl biologisch vorgegebener Konzeptformen und damit verbundener computationaler Prozesse, die gemeinsam die Grammatik der Wahrnehmung bilden und hochstrukturiert im perzeptuellen System vorliegen. Eine Konzeptform kann man sich als eine Art abstraktes Objekt oder im computationalen Sinne als Datenformat, das den Raum der möglichen Operationen absteckt, vorstellen. Als Beispiele für Konzeptformen nennt Mausfeld „perzeptuelles Objekt“, „Oberfläche“, „Essen“, „Feind“, „Meinesgleichen“, „Selbst“ oder „Kausalereignis“. Zu einer Konzeptform gehören verschiedene Attribute wie beispielsweise „emotionaler Zustand“ oder „Farbe“, deren Ausprägung als Wert (z.B. „blau“) bezeichnet wird. Um eine Konzeptform zu triggern, müssen nicht alle in der Konzeptform angelegten Werte der ihr zugeordneten Attribute im sensorischen Code enthalten sein. So kann auch eine „unvollständige“ Information ein Konzept aktivieren, ein entscheidender Schritt zur Interpretation des sensorischen Codes (vgl. Mausfeld, 2011a). An dieser Stelle wird deutlich, dass die Qualität und der Informationsgehalt der im perzeptuellen System verarbeiteten Informationen deutlich über die im sensorischen Code enthaltenen Informationen hinausgeht. Konzeptformen stehen zudem miteinander in unterschiedlichen Beziehungen (Mausfeld, 2011a). Beziehungen zwischen Konzeptformen definieren die Struktur, in der die Konzeptformen organisiert sind und definieren damit eine Art Wissen. Bei der computationalen Verarbeitung kann es zu Interaktionen verschiedener Konzeptformen kommen. Das Ergebnis des perzeptuellen Systems steht wiederum anderen komplexen Systemen zur Verfügung. Hierzu gehören interpretative Systeme, die über perzeptuelles Wissen hinausgehendes Wissen beinhalten, Imaginationssysteme und Systeme, in denen das

phänomenale Perzept generiert wird (Mausfeld, 2011a). Die Externalisierung des Perzepts, also die Zuschreibung des Perzepts zur Außenwelt, sodass wir subjektiv den Eindruck haben unsere Außenwelt direkt und objektiv zu betrachten, entsteht ebenfalls in komplexen Systemen außerhalb des perzeptuellen Systems. Hieran wird eine weitere grundlegende Überlegung zum Aufbau unseres Wahrnehmungssystems bzw. allgemeiner unserer kognitiven Organisation deutlich. So geht die integrative Theoriperspektive von einem modularen Aufbau des kognitiven Systems aus (Mausfeld, 2011b). Dabei können, gemäß Mausfeld, verschiedene Subsysteme und Systeme - auch Module genannt - miteinander kommunizieren, andere Systeme jedoch nicht.

In dieser Beschreibung wird deutlich, dass auch in diesem integrierenden Modell computationale Informationsverarbeitungsüberlegungen eine wichtige Rolle spielen, jedoch werden diese in Verbindung mit funktionalen Überlegungen zum Aufbau des Wahrnehmungssystems kombiniert.

1.6.3.1 Farbwahrnehmung im integrativen Wahrnehmungsmodell

Mausfeld (2003) postuliert zwei Konzeptformen, die Konzeptform „Oberfläche“ und die Konzeptform „lokale und ambiente Beleuchtung“. Beiden sind jeweils die Attribute „Farbe“ zugeordnet. Neben diesen beiden Konzeptformen kann es noch eine Vielzahl weiterer Konzeptformen (z. B. „transparentes Medium“) geben, die ein Attribut „Farbe“ enthalten. Ihnen allen ist gemeinsam, dass sie auf die gleiche, im sensorischen Code enthaltene, Information zugreifen, jedoch unterscheiden sich die Konzeptformen im Hinblick auf die weiteren Attribute und die Operationen, die mit den Daten der verschiedenen Konzeptformen durchgeführt werden, sowie die Verbindungen zwischen den Konzeptformen. Die intensive Beschäftigung mit diesem erst in jüngerer Zeit wiederentdeckten Ansatz steht erst am Anfang, jedoch gibt es vielversprechende Indizien, die mit ihm in Einklang stehen (Mausfeld, 2003).

“when a room is illuminated either by the yellow light of a candle, or by the red light of a fire, a sheet of writing paper still appears to retain its whiteness”

(Young, 1807; zitiert nach Mollon, 2003)

2. Farbkonstanz

Dieses Kapitel stellt das Phänomen Farbkonstanz vor, das auf einer komplexen Leistung unseres visuellen Systems beruht, welche wir aber im täglichen Leben nicht als solche wahrnehmen. Hinter dem Phänomen der Farbkonstanz verbirgt sich ein komplexes Problem, wobei das Farbkonstanzproblem als ein intensiv erforschtes Problem einer ganzen Gruppe von Konstanzproblemen in der visuellen Wahrnehmung betrachtet werden kann. Auf eine vollständige Darstellung des theoretischen Hintergrunds und der Befundlage zur Farbkonstanz muss aufgrund des immensen Umfangs an Forschung und Literatur verzichtet werden. Deshalb konzentriert sich dieses Kapitel darauf, das Farbkonstanzproblem zu verdeutlichen (Abschnitt 2.1) und den Leser mit zwei zentralen Sichtweisen auf das Farbkonstanzproblem vertraut zu machen: mit adaptationalen Ansätzen (Abschnitt 2.2) sowie Ansätzen zur Beleuchtungsschätzung (Abschnitt 2.3). Hierzu werden exemplarisch zentrale Modelle und Befunde dieser Ansätze herausgegriffen und erläutert. Bisherige Forschung arbeitete häufig mit der Integration vieler gleichzeitig in der Szenerie repräsentierten Informationen, einer sogenannten räumlichen Informationsintegration. In dieser Arbeit wird jedoch die Informationsintegration über die Zeit hinweg als mögliche Informationsquelle zur Lösung des Farbkonstanzproblems untersucht, weshalb sich Abschnitt 2.4 intensiv mit aktuellen Befunden zur temporalen Informationsintegration befasst. Zudem wird die Herleitung der Fragestellungen bzw. der Hypothesen vorbereitet, wobei die Hypothesen in Abschnitt 2.5 konkret formuliert werden.

2.1 Das Farbkonstanzproblem

Fällt Licht, das von einem in einer Szene vorhandenen opaken Objekt reflektiert wurde, in unser Auge, so ist die an den Fotorezeptoren ankommende Information aus zwei fest miteinander verbundenen Eigenschaften zusammengesetzt: den Reflektanzeigenschaften der Oberfläche des Objekts und den spektralen Energieeigenschaften der Beleuchtung. Unser visuelles Wahrnehmungssystem verarbeitet, ergänzt und in-

interpretiert diese Informationen und konstruiert daraus einen Farbeindruck, der in unserer perzeptuellen Empfindung der Oberfläche des Objektes zugeordnet wird. Verändert sich die Beleuchtung, verändert sich auch das reflektierte Licht, das in unser Auge fällt und damit die Information, die an die Rezeptoren im Auge gelangt. Der perzeptuelle Eindruck von der Farbe der Oberfläche des Objektes bleibt jedoch hinreichend konstant. Dieser Eindruck der farblichen Konstanz der wahrgenommenen Oberflächen trotz Veränderungen der spektralen Eigenschaften der Beleuchtung oder Veränderungen der Intensität der Beleuchtung wird als Farbkonstanz bezeichnet (Brainard, 2004; Foster, 2011; Foster et al., 1997; Shevell, 2003). Dieser engen Definition, die Farbkonstanz explizit in den Kontext der Beleuchtungsänderung stellt, steht eine weiter gefasste gegenüber, wie sie von Smithson (2005) berichtet und von Brown (2003) ausführlich vorgestellt wird. Diese weiter gefasste Definition leitet Brown aus einer Arbeit Hochbergs (Hochberg, 1988, zitiert nach R. O. Brown, 2003) ab, und definiert Farbkonstanz als die Konstanz der wahrgenommenen Objektfarbe trotz Veränderungen des proximalen Reizes. Damit öffnet Brown die Definition auch beispielsweise für atmosphärische Einflüsse, deren Filterwirkung beispielsweise bei Nebel leicht erkennbar ist²². Da die vorliegende Arbeit den Einfluss der Beleuchtung untersucht, wird der Begriff Farbkonstanz im Kontext der Beleuchtungsänderung und somit in der strengeren Fassung der Definition verwendet. Das Farbkonstanzproblem, das durch die Verbindung von Beleuchtungseigenschaften und Oberflächenreflektanzeigenschaften zur einer Einheit im sensorischen Input und der daraus unterdeterminierten Information zur Trennung dieser ursprünglichen Informationen resultiert, stellt sich in zwei Weisen dar. Zum einen bedeutet dies, wie im eingangs beschriebenen Beispiel, dass die gleiche Oberfläche unter zwei verschiedenen Beleuchtungen in einem unterschiedlichen Zapfenerregungsmuster und damit einem unterschiedlichen sensorischen Input resultieren kann. Andererseits bedeutet dies auch, dass derselbe lokale sensorische Input nicht in der gleichen Farbwahrnehmung resultieren muss, wie sich in der Arbeit von McCann, McKee und Taylor (1976) zeigt. Diese ließen Versuchspersonen in einem asymmetrischen Abgleichsexperiment, bei dem das eine Auge an die Beleuchtungsbedingungen des Vorgabestimulus adaptiert wurde und das andere an die Beleuchtungsbedingungen des Teststimulus, für jedes Papierfeld eines

²² Viele Autoren sehen Phänomene der chromatischen Induktion, wie den Simultan- und den Sukzessivkontrast und Farbkonstanzphänomene als zwei Seiten einer Medaille. Daher entstehen Erklärungsansätze, die beide Phänomenklassen mit einbeziehen (Werner, 2014). Eine eingehende Untersuchung dieser chromatischen Induktionsphänomene ist nicht Teil dieser Arbeit, die sich mit chromatischen Regularitäten als Hinweisreizen für die Beleuchtungsschätzung in temporalen Informationsintegrationsprozessen beschäftigt, findet sich jedoch an anderer Stelle, z. B. bei Ekroll und Faul (2009, 2012).

Mondrianstimulus²³, ein gleich aussehendes Pendant aus dem *Munsell Book of Color* auswählen. Die Versuchspersonen lösten diese Aufgabe, dann wurde die Beleuchtung des als Vorgabereiz fungierenden Mondrianstimulus so verändert, dass ein farbiges Papier nun exakt das gleiche Farbsignal erzeugte, das zuvor ein anderes Papier erzeugt hatte. Dennoch behielten die Versuchspersonen ihre Zuordnung bei.

Die Situationen, in denen vom Wahrnehmungssystem eine Farbkonstanzleistung erzielt wird, sind vielfältig. Generell lassen sich zwei grundsätzlich verschiedene Situationsarten unterscheiden: sukzessive Farbkonstanz, umfasst die Farbkonstanzleistung bei einem Wechsel der Beleuchtung, wie er beim Aufziehen von Bewölkung oder durch den sich verändernden Sonnenstand entstehen kann (Brainard, 2004). Simultane Farbkonstanz beschreibt die Farbkonstanzleistung innerhalb einer Szene, wenn in dieser verschiedene Beleuchtungssituationen gleichzeitig auftreten, die durch die Geometrie der Szene verursacht wurden (Brainard, 2004). So könnten beispielsweise in einigen Bereichen Schatten auftreten oder einige Objekte sehr weit entfernt sein²⁴ ²⁵. Streng genommen ist das zu Beginn dieses Abschnitts erläuterte Beispiel ein Beispiel, in welchem gute Farbkonstanzleistungen erzielt wurden. Hieraus darf jedoch nicht abgeleitet werden, dass Menschen immer annähernd farbkonstante Beobachter sind (Maloney & Yang, 2003) und damit Farbkonstanz eine feste perzeptuelle Eigenschaft sei. Vielmehr ist Farbkonstanz als relatives Phänomen anzusehen (Brainard, 2004). So schwankt der Grad der erreichten Farbkonstanz beispielsweise in Abhängigkeit von den Bedingungen, unter denen sie untersucht wird. Der Grad der erreichten Farbkonstanz variiert in Abhängigkeit von den Eigenschaften und dem Informationsgehalt der Szene²⁶ (Kraft & Brainard, 1999; Linnell & Foster, 2002), den Eigenschaften der Beleuchtung (z. B. Gelb, 1929), der Art und Weise der Messung bzw. der Aufgabe²⁷ (z. B. Foster, 2011; Hansen, Walter, & Gegenfurtner, 2007), der Instrukti-

²³ Mondrianstimuli sind Stimuli, die sich aus verschiedenen, plan in einer Ebene liegenden, eckigen Farbflächen zusammensetzen, ähnlich der Gemälde von Piet Mondrian. McCann et al. (1976) arbeiteten mit farbigen Papieren, andere Autoren bevorzugten eine digitale Präsentation von Mondrianstimuli.

²⁴ Häufig werden auch sehr reduzierte Szenen als Beispiele für simultane Farbkonstanz betrachtet. Hierzu gehört beispielsweise der Simultankontrast.

²⁵ Brainard (2004) weist zudem darauf hin, dass die Verbindung von simultaner und sukzessiver Farbkonstanz nicht zwangsläufig eine einfache ist. So setzt simultane Farbkonstanz beispielsweise Bildsegmentierungsleistungen wie das Identifizieren beschatteter Bereiche voraus, was zum Erreichen sukzessiver Farbkonstanz nicht notwendig ist (Brainard, 2004).

²⁶ Ein extremes Beispiel aus der Untersuchung der Helligkeitskonstanz ist Gelbs (1929) Experiment, das in Abschnitt 2.4.2 beschrieben wird.

²⁷ So unterscheidet man zwischen dem Abgleich eines Standard- oder Vergleichsreizes unter Beleuchtung 1 mit einem Testreiz unter Beleuchtung 2. Dabei können der Test- und Vergleichsreiz gleichzeitig (*simultaneous asymmetric matching*) zeitlich nacheinander (*successive*

on²⁸ (z. B. Arend & Reeves, 1986; Delahunt & Brainard, 2004) oder des Blickverhaltens der Versuchsperson (Golz, 2010; Granzier, Toscani, & Gegenfurtner, 2012; Lee & Smithson, 2012). Einige Autoren betonen daher die Wichtigkeit, den Grad der Farbkonstanz mit Hilfe von Farbkonstanzindizes zu beschreiben (Foster, 2011). Ein klassischer Index, dessen grundlegende Idee viele Arbeiten aufgegriffen haben, ist der *Brunswik ratio* (vgl. Jameson & Hurvich, 1989). Dieser wurde zwar ursprünglich zur Beschreibung von Helligkeitskonstanz entwickelt, lässt sich jedoch auf verschiedene andere Bereiche perzeptueller Konstanz übertragen (Gilchrist, 2006). Foster (2011) nimmt eine solche Umformung des Helligkeitskonstanzindex (vgl. Gilchrist, 2006) zu einem Farbkonstanzindex vor und definiert ihn mit $BR = c/a$. Hierbei ist c die Differenz (Euklidische Distanz im Chromatizitätsdiagramm) zwischen der Testfeldeinstellung des Beobachters unter der Zielbeleuchtung und der Chromatizität des Testfeldes unter einer neutralen Standardbeleuchtung und wird an a normiert. a entspricht hierbei der Differenz zwischen dem idealen - also perfekt farbkonstanten - Abgleich unter der Zielbeleuchtung und der Chromatizität des Testfeldes unter der Standardbeleuchtung. Diese Grundidee, einen vom Farbraum unabhängigen Index zu generieren, wird in vielen Varianten verwendet, eine weitere, viel genutzte stellen beispielsweise Arend und Kollegen vor (Arend, Reeves, Schirillo, & Goldstein, 1991). Im Grunde liegt der erreichte Farbkonstanzgrad zwischen perfekter und nicht vorhandener Farbkonstanz. In einem asymmetrischen Abgleichsexperiment wäre dies beispielsweise zwischen einer perfekt farbkonstanten Einstellung und einer dem proximalen Reiz des Vorgabereizes entsprechenden Einstellung (vgl. Jameson & Hurvich, 1989). Einen Überblick über die Variabilität empirischer Farbkonstanzmessungen in Abhängigkeit vom Untersuchungsparadigma findet sich bei Foster (2011), kritische Überlegungen zur Konstruktvalidität finden sich bei Foster (2003).

asymmetric matching) oder für jeweils ein Auge (*haplosopic matching*) dargeboten werden. Eine andere Form des Abgleichs ist der Abgleich mit einem internen Standard. Die Aufgabe der Versuchsperson besteht darin ein Testfeld so einzustellen, dass es in bestimmter Weise erscheint. Soll es weiß oder grau erscheinen (*achromatic setting*) kann mit dieser Methode nur ein Punkt im Farbraum gemessen werden. Eine Erweiterung hierzu ist die Aufgabe, das Testfeld so anzupassen, dass es weder die Farbe einer Farbkategorie noch deren Komplementärfarbe hat, beispielsweise weder rot noch grün oder weder blau noch gelb ist („Urfarben“-Einstellung). Des Weiteren werden Klassifikationsaufgaben verwendet, bei denen die Versuchsperson die Aufgabe hat, die Farbe des Testfeldes einer Kategorie zuzuordnen oder sie zu benennen.

²⁸ Arend und Reeves (1986) verdeutlichen die zentrale Rolle der Instruktion, indem sie zeigen, dass sich Testfeldeinstellungen bei Abgleichsaufgaben (*color matching*) stark zwischen verschiedenen Instruktionen unterscheiden. So führen die Instruktion, das Testfeld so einzustellen, dass es in Farbton und Sättigung zum Vergleichsfeld passt, und die Instruktion, das Testfeld so einzustellen, als wäre es aus dem gleichen Stück Papier geschnitten wie das Vergleichsfeld, zu sehr unterschiedlichen Testfeldeinstellungen.

Das Phänomen der Farbkonstanz, das wir im Alltag als selbstverständlich empfinden und dem wir uns in der Regel nicht bewusst werden, ist schon seit dem 17. Jahrhundert als solches bekannt (Mollon, 2003). Einen Überblick über diese sehr frühen Überlegungen zum Phänomen der Farbkonstanz gibt ebenfalls Mollon. Um einen solchen farbkonstanten perzeptuellen Eindruck zu erzeugen, muss es dem Wahrnehmungssystem möglich sein, mit der sich verändernden Beleuchtung umzugehen. Eine Möglichkeit des Umgangs bieten die adaptationalen Ansätze, die im Folgenden vorgestellt werden.

2.2 Adaptationale Ansätze

Eine denkbare Möglichkeit, wie das visuelle System mit der sich verändernden Beleuchtung umgehen könnte, zeigen adaptationale Ansätze auf, die Adaptationsprozesse in den Mittelpunkt ihrer Untersuchung stellen. Dabei steht insbesondere die Suche nach einfachen elementaren Mechanismen im Vordergrund, mit deren Hilfe eine Neutralisierung bzw. Eliminierung des Beleuchtungseinflusses erreicht wird (Mausfeld, 1998). Exemplarisch soll hier der Koeffizientensatz von Johannes von Kries (1905) in seiner heutigen Fassung vorgestellt werden (z. B. Brainard, 2004; Mausfeld, 1998; van Trigt, 2010). Dieser, in der elementaristischen Tradition entstandene Ansatz, wurde in jüngere Ansätze aufgenommen, beispielsweise in die Retinextheorie (Land, 1983, 1986) und in einer Arbeit von Brainard (2004; Kraft & Brainard, 1999) intensiv untersucht, wobei jüngere Ansätze das Farbkonstanzproblem häufig aus computationaler Perspektive betrachten. Ein anderer aktueller Ansatz, der ohne die Annahme einer Beleuchtungsschätzung auskommt, ist der Ansatz von Foster und Kollegen zur relationalen Farbkonstanz (Foster et al., 1997; Foster & Nascimento, 1994; Nascimento & Foster, 1997). Im Folgenden sollen die von Kries-Adaptation und der von Foster und Nascimento (1994) vorgestellte Ansatz der relationalen Farbkonstanz, den Smithson (2005) als wichtigsten Ansatz des letzten Jahrzehnts bezeichnet, näher vorgestellt werden.

2.2.1 von Kries Adaptation

Von Kries untersuchte mit Hilfe eines klassischen fovealen Abgleichsexperiments die Adaptation. Hierbei stellte er fest, dass wenn die Einstellung des Testreizes als zum Vergleichsreiz gleichaussehend betrachtet wurde, dies noch immer der Fall war, nachdem die Versuchspersonen an ein Adaptationslicht adaptiert waren (von Kries, 1905). Das bedeutet, Testreiz und Vergleichsreiz unterscheiden sich auch nach der Adaptation nicht voneinander, es bedeutet jedoch nicht dass der Farbeindruck vor der Adaptation dem Farbeindruck nach der Adaptation entspricht. Aus heutiger Sicht liegt ein Ausgangspunkt des von-Kries-Ansatzes, in der zentralen Aussage der Young-Helmholtz-Theorie (von Kries, 1905), dass für das Farbsehen von drei verschiede-

nen Rezeptortypen auszugehen ist. Um den Einfluss sich verändernder Beleuchtung zu kontrollieren, schlägt von Kries vor, dass jeder dieser drei Zapfenrezeptortypen mit einer multiplikativen Sensitivitätskontrolle (Brainard, 2004) ausgestattet sei. Diese multiplikative Sensitivitätskontrolle kann durch eine reelle Zahl ($g_i(s)$), mit der die Zapfensensitivitätsfunktion multipliziert wird, ausgedrückt werden. Dies bedeutet, dass im von Kries-Modell die drei Gewichtungsfaktoren der Sensitivitätskontrolle, mit denen die Zapfensensitivitätsfunktionen gewichtet werden, genügen, um Adaptation vollständig zu beschreiben. Dieses ursprünglich physiologisch und am Beispiel einer sukzessiven Präsentation von Adaptationslicht (s) und Testlicht (b) gedachte Modell sieht den Adaptationsprozess in einer differentiellen Ermüdung der Rezeptoren verwirklicht (Mausfeld, 1998).

In den darauffolgenden Jahrzehnten wurde von Kries' Modell in ein psychophysikalisches Modell übertragen und dabei die Einschränkung auf zeitliche Kontexte aufgehoben und um räumliche Kontexte erweitert. Im Zentrum dieses psychophysikalischen Modells steht ebenfalls die multiplikative Sensitivitätskontrolle. Dies bedeutet, dass die Sensitivität eines Zapfentyps umgekehrt proportional zum räumlichen aggregierten Mittelwert der Zapfenerregung des selben Zapfentyps, reguliert wird (Brainard, 2004). Hieraus ergeben sich von Kries adaptierte Rezeptorsignale (Gleichung 2.1), welche auf den in Gleichung 1.16 dargestellten Zapfenerregungsfunktionen basieren. Eine übliche mathematische Darstellung der Skalierungsfaktoren ist die Darstellung mit Hilfe einer Koeffizientenmatrix, welche nur in der Diagonale von 0 verschiedene Werte enthält (Brainard, 2004).

$$\begin{aligned} A_L &= \int e_b(\lambda) g_L(s) \cdot l(\lambda) d\lambda \\ A_M &= \int e_b(\lambda) g_M(s) \cdot m(\lambda) d\lambda \\ A_S &= \int e_b(\lambda) g_S(s) \cdot s(\lambda) d\lambda \end{aligned} \tag{2.1}$$

wobei A_i für das adaptierte Zapfensignal, $e_b(\lambda)$ für das ins Auge fallende Licht bzw. Farbsignal und $l(\lambda)$, $m(\lambda)$ und $s(\lambda)$ für die Zapfensensitivitätsfunktionen stehen.

Analog zur Metamerie, die das gleiche Aussehen zweier Lichter im unadaptierten Zustand des Auges beschreibt, sind zwei gleich aussehende Testfelder als *isophen* zu beschreiben, die in unterschiedlichen Kontexten dargeboten wurden oder in unterschiedlichen Adaptationszuständen des Auges präsentiert wurden (Mausfeld, 1998). Die Young-Helmholtz Theorie sieht die Erklärung für zwei metamere Lichtreize darin, dass sie dieselben Rezeptorerregungen verursachen. Übertragen auf die von Kries adaptierten Rezeptorsignale ist also zu erwarten, dass zwei Reize b und c , welche die-

selben von Kries adaptierten Rezeptorsignale A_i^b und A_i^c mit $i = L, M, S$ verursachen, als isophen wahrgenommen werden. Das bedeutet auch, wenn zwei metamere Reize b und c an denselben räumlichen oder zeitlichen Kontext s adaptiert werden, sollten diese auch nach der Adaptation isophen sein (Gleichung 2.2), was letztendlich in der Persistenzforderung zu den Grassmann-Gesetzen niedergelegt ist (vgl. Abschnitt 1.3). An dieser Stelle wird deutlich, dass die multiplikative Sensitivitätskontrolle die gleiche Auswirkung hat wie eine Veränderung der Lichtintensität für einen Rezeptor (Mausfeld, 1998). Mausfeld beschreibt die inhaltliche Ableitung weiterer Forderungen wie das Fortbestehen der Gültigkeit der Grassmann-Gesetze bei einem stabilen Adaptationszustand, insbesondere auch im Falle haploskopischer Adaption²⁹.

$$b \sim c \Leftrightarrow \int e_b(\lambda) g_i(s) \cdot V_i(\lambda) d\lambda = \int e_c(\lambda) g_i(s) \cdot V_i(\lambda) d\lambda$$

2.2

mit $i = L, M, S$

Die Übertragung des von-Kries-Adaptationsmodells in den Farbkonstanzkontext folgt folgender Logik. Betrachtet ein Beobachter ein Testfeld, das in einer visuellen Szene verankert ist, so sind im daraus resultierenden visuellen Input sowohl Beleuchtungs-informationen als auch Informationen der Oberflächen enthalten, wodurch gemäß den Prinzipien der von-Kries-Adaptation auch Oberflächeneigenschaften in die multiplikativen Skalierungsfaktoren eingehen. Verändert sich die Beleuchtung, geht die Änderung der multiplikativen Skalierungsfaktoren auf die Beleuchtung zurück, wodurch die multiplikativen Skalierungsfaktoren zu einer Stabilisierung der adaptierten Rezeptorsignale führen (Brainard, 2004).

Die psychophysikalische Formulierung des von Kries Ansatzes wurde intensiv geprüft (Mausfeld, 1998). So berichtet Mausfeld, dass alle Postulate des von Kries Modells untersucht wurden und nicht in der von von Kries formulierten Form gehalten werden können. Brainard hat die Vorhersagen des von Kries Ansatz im Kontext der Farbkonstanzforschung untersucht (Brainard, 2004; Brainard, Brunt, & Speigle, 1997; Brainard & Wandell, 1992). Diese Untersuchungen zeigen, dass in Laborsituationen mit einfachen Mondrianstimuli und natürlichen Beleuchtungen einige Vorhersagen durchaus eintreffen.

2.2.2 Relational Colour Constancy

David Foster und seine Kollegen führen zwei grundsätzliche Neuerungen bei ihren Untersuchungen zur *relational colour constancy* (RCC) ein, eine inhaltliche Neuausrichtung der untersuchten Farbkonstanz und einen Wechsel des üblichen Untersu-

²⁹Als *haploskopische Adaptation* wird bezeichnet, wenn das eine Auge des Beobachters an eine Adaptationsreiz s das andere Auge jedoch an einen Adaptationsreiz s' adaptiert wird.

chungsparadigmas. Theoretisch ordnen sie ihren Ansatz dabei nicht als Beleuchtungsschätzungsansatz (vgl. Abschnitt 2.3) ein, sondern betonen, dass ihr Modell ohne eine solche Annahme auskommt (Foster, 2011). Inhaltlich beschreibt die relational colour constancy die Konstanz der wahrgenommenen Verhältnisse zwischen den Oberflächenfarben einer Szene bei Beleuchtungsveränderungen (Foster et al., 1997). Das bedeutet, Foster et al. definieren nicht die wahrgenommene Oberflächenfarbe als zentrales Konstanzkriterium, sondern stattdessen das Verhältnis der Oberflächenfarben zueinander. Basis dieser Idee ist die Beobachtung, dass Beobachter in der Lage sind, schnell und mit hoher Reliabilität zu entscheiden, ob es sich bei einer Veränderung des Reizes um einen Wechsel der Beleuchtung handelt oder nicht (Foster & Nascimento, 1994). Hierbei liegt die Schlussfolgerung nahe, dass für diese Fähigkeit eine Nutzung der Verhältnisse der Farbreize im proximalen Reiz ursächlich sein könnte. Foster und Nascimento untersuchten hierzu das Verhältnis der Zapfenerregungen zwischen zwei Oberflächen für jeden Rezeptortyp und stellten fest, dass dieses auch über einen Beleuchtungswechsel hinweg weitestgehend invariant bleibt (Foster & Nascimento, 1994). Weitestgehend invariant bedeutet hierbei, dass bei einem natürlichen Beleuchtungswechsel die Zapfenerregungsverhältnisse nicht exakt invariant bleiben, sondern kleinere Abweichungen auftreten. Diese Abweichungen ordnen Nascimento und Foster (1997) als zufällige, also unsystematische und damit vernachlässigbare Abweichungen ein. Wenn die invarianten Zapfenerregungsverhältnisse als Hinweis für eine Beleuchtungsveränderung interpretiert werden, dann würden starke Abweichungen von der exakten Invarianz der Zapfenerregungsverhältnisse gegen eine Beleuchtungsveränderung und für eine Veränderung der Oberflächen sprechen.

Diese Vermutung untersuchten die Autoren mit einer Variation des vorgestellten Paradigmas. In dieser Variante zeigten sie den Versuchspersonen in einer *two-alternative forced choice* Aufgabe (2AFC) zwei Beleuchtungswechsel und stellten sie vor die Aufgabe zu entscheiden, welcher der beiden Beleuchtungswechsel mehr wie ein natürlicher Beleuchtungswechsel aussehe. Stellte man Versuchspersonen vor die Wahl, sich zwischen einem natürlich simulierten Beleuchtungswechsel, bei welchem die Zapfenerregungsverhältnisse weitestgehend invariant sind und einem simulierten Beleuchtungswechsel, bei welchem die Zapfenerregungsverhältnisse exakt invariant sind, zu entscheiden, bevorzugten die Versuchspersonen den Beleuchtungswechsel mit exakt invariant simulierten Zapfenerregungsverhältnissen (Nascimento & Foster, 1997). Einschränkend ist natürlich zu erwähnen, dass zu geringe Unterschiede von den Versuchspersonen nicht zuverlässig detektiert werden konnten. Ihre These, dass die Invarianz der Zapfenerregungsverhältnisse einen wichtigen Hinweisreiz (*cue*) für eine Beleuchtungsveränderung darstellt, untermauern sie durch den Befund, dass die Versuchspersonen mit zunehmender Abweichung der natürlich simulierten Beleuch-

tungswechsel von den mit exakt invarianten Zapfenerregungsverhältnissen simulierten Beleuchtungswechseln immer stärker die mit exakt invarianten Zapfenerregungsverhältnissen simulierten Beleuchtungswechsel bevorzugen (Nascimento & Foster, 1997).

Wenn die Verhältnisse zwischen zwei Oberflächen bei einem Beleuchtungswechsel invariant bleiben, lässt sich die Veränderung, die ein Beleuchtungswechsel verursacht, als multiplikativer Faktor betrachten, wodurch die jeweilige Erregung eines Zapfentyps multiplikativ in die Erregung dieses Zapfentyps unter anderer Beleuchtung überführbar ist. Dieser lineare Zusammenhang wird im Folgenden als *exakte Normalisationskompatibilität* der Zapfenerregungsverhältnisse bezeichnet.

2.3 Beleuchtungsschätzungsansätze

Dem adaptationalen Ansatz lässt sich ein zweiter theoretischer Ansatz gegenüberstellen. Anstatt die Wirkung der Beleuchtung zu eliminieren, kann diese auch geschätzt werden und diese Schätzung zur Trennung von Oberflächen- und Beleuchtungseigenschaften genutzt werden. Die Beleuchtungsschätzung kann dann möglicherweise dem Wahrnehmungssystem für weitergehende Operationen zur Verfügung stehen. Beleuchtungsschätzungsansätze gehen also davon aus, dass die Beleuchtung im Wahrnehmungssystem repräsentiert wird (z. B. Abschnitte 1.6.2, 1.6.3), auch wenn dies, wie Smithson (2005) betont, nicht unbedingt bedeutet, dass dies dem Beobachter bewusst werden muss³⁰. Im Zentrum der Forschung zur Beleuchtungsschätzungshypothese steht die Frage, welche Informationen aus dem sensorischen Input zur Etablierung einer solchen Schätzung vom visuellen System verwendet werden könnten. Die zunächst naheliegende Idee ist, die Lichtquelle direkt zu betrachten und die Beleuchtung zu schätzen. Jedoch stehen diese Informationen oftmals nicht zur Verfügung, entweder weil die Lichtquelle nicht direkt beobachtet werden kann oder zu hell ist, um sie direkt zu betrachten (Maloney & Yang, 2003). Daher konzentrieren sich viele Arbeiten auf die Suche nach im retinalen Input enthaltenen chromatischen Regelmäßigkeiten, welche das visuelle System als Hinweisreiz für die Beleuchtungsschätzung heranziehen könnte. Zur Untersuchung solcher Fragestellungen wird in der Wahrnehmungsforschung oft mit stark vereinfachten visuellen Szenen gearbeitet, die Brainard und Maloney (2011) als *flatte-matte-diffuse* bezeichnen. Charakteristische

³⁰ Streng computationale Ansätze, als eine spezifische Gruppe der Beleuchtungsschätzungsansätze, gehen im Grunde genommen von einer Art zweistufigem Prozess aus (Rutherford & Brainard, 2002), der vollständig mathematisch modelliert wird. Der erste Schritt beinhaltet die Etablierung einer Beleuchtungsschätzung auf Basis der im proximalen Reiz enthaltenen Informationen; im zweiten Schritt wird diese Beleuchtungsschätzung verwendet, um eine annähernd beleuchtungsunabhängige Repräsentation der Oberflächen zu generieren, indem die Farbsignale um den Beleuchtungsanteil korrigiert werden (Rutherford & Brainard, 2002).

Eigenschaften zur Beschreibung dieser Szenen sind, dass sie zweidimensional sind, sich aus matten Oberflächen zusammensetzen und eine gleichmäßige, diffuse Beleuchtung über der gesamten Szene liegt.

Auf der Suche nach chromatischen Regelmäßigkeiten, die sich systematisch mit der Veränderung der Beleuchtung verändern, führten MacLeod und Golz (2003; Golz, 2005) eine umfassende Analyse der Umweltgegebenheiten durch. Ihr Ziel war, Regelmäßigkeiten im beleuchtungsabhängigen proximalen Reiz zu identifizieren, die dem Wahrnehmungssystem als potentielle Hinweisreize dienen könnten. Diese Suche nach Regelmäßigkeiten im chromatischen Input kann auf unterschiedlichen Aggregationsebenen stattfinden. Hier werden zwei in Betracht gezogen. Auf der geringeren Aggregationsebene werden Regelmäßigkeiten bei der Veränderung der Farbsignale einzelner Oberflächen bei einem Beleuchtungswechsel untersucht. Hierbei detektierten MacLeod und Golz zwei zentrale Regelmäßigkeiten: die exakte Normalisierbarkeit und die chromatisitätsabhängige Luminanzveränderung. Auf der höheren Aggregationsebene steht die Untersuchung der Veränderungen auf der Untersuchungsebene der gesamten Szene im Vordergrund. Ziel ist es hier, eine Regelmäßigkeit der Veränderung der gesamten Szene zu finden. Mit Hilfe statistischer Maße wird diese Regelmäßigkeit in der Veränderung des visuellen Inputs beschrieben. Ein Beispiel für ein solches Maß ist der chromatische Mittelwert, ein anderes die Korrelation von Luminanz und Rötlichkeit. In einem nächsten Schritt unterzogen MacLeod und Golz die so identifizierten potentiellen Hinweisreize einer empirischen Prüfung.

2.3.1 Regularitäten unterschiedlicher Aggregationsebenen: multiplikative Normalisierbarkeit und chromatischer Mittelwert

Im Folgenden sollen zwei Regularitäten vorgestellt werden, die sich auf unterschiedliche Aggregationsebenen beziehen. Die Untersuchung der multiplikativen Normalisierbarkeit ist eine Untersuchung auf Basis einzelner Oberflächen. Die Untersuchung des chromatischen Mittelwertes hingegen ist die Untersuchung einer Regularität auf Szenenebene und damit auf einer höheren Aggregationsebene. Dass vom chromatischen Mittelwert als einer Szenenstatistik erster Ordnung gesprochen wird, ist als Anspielung auf die statistische Funktion zu werten (Mausfeld & Andres, 2002).

2.3.1.1 Multiplikative Normalisierbarkeit - Veränderungen im Farbsignal einzelner Oberflächen

Multiplikative Normalisierbarkeit beschreibt Beleuchtungsveränderungen, die dergestalt sind, dass sie durch eine umgekehrt proportionale Skalierung getrennt für den Rezeptorinput jedes Zapfenrezeptortyps beschrieben werden können, was durch die von der Beleuchtungsveränderung verursachten systematischen Veränderungen des von den Oberflächen einer Szene reflektierten Lichts möglich wird (MacLeod & Golz,

2003). Damit bezieht sich der Begriff der multiplikativen Normalisierbarkeit auf das Verhalten des Signals einzelner Oberflächen (oder Pixel) einer Szene bei einem Beleuchtungswechsel. Der Begriff der Normalisierbarkeit beschreibt also eine Skalierung des visuellen Inputs unabhängig von einem konkreten Verarbeitungsschritt des visuellen Systems und konzentriert sich somit rein auf die mathematisch statistische Regularität. Hierin liegt der Unterschied zum adaptationalen von-Kries-Ansatz (vgl. MacLeod & Golz, 2003), da von Kries die Skalierung als direkte Verringerung der Rezeptorsensitivität beschreibt und somit die Position im Wahrnehmungsprozess sowie die physiologische Bedeutung festlegt (vgl. Abschnitt 2.2.1). Golz (2005) zeigt in einer Simulation, welche auf Hyperspektralbildern³¹ von Ruderman, Cronin und Chiao (1998) basiert, dass die im MacLeod-Boynton-Chromatizitätsdiagramm logarithmisch dargestellten Chromatizitäten des retinalen Inputs der Pixel sich bei einem Beleuchtungswechsel annähernd um denselben multiplikativen Faktor verändern, was MacLeod und Golz als *Rigiditätsprinzip* bezeichnen.

2.3.1.2 Chromatischer Mittelwert als Hinweisreiz für die Beleuchtungsschätzung - eine Szenenstatistik 1. Ordnung

Neben der multiplikativen Normalisierbarkeit, spielt die Untersuchung des chromatischen Mittelwertes des retinalen Inputs als Hinweis auf die Beleuchtung eine wichtige Rolle. Der chromatische Mittelwert ist eine oberflächenübergreifende Größe, die eine Regelmäßigkeit auf dem Aggregationsniveau der gesamten Szene beschreibt. Der Vorteil chromatischer Szenenstatistiken im Vergleich zur Untersuchung der Veränderungen einzelner Oberflächen bei einem Beleuchtungswechsel liegt darin, dass eine chromatische Szenenstatistik unabhängig vom Auftreten eines Beleuchtungswechsels zur Verfügung steht.

Die Untersuchung des chromatischen Mittelwerts ist naheliegend, da dieser direkt von der Beleuchtung beeinflusst wird und damit zur Beleuchtungsschätzung und anschließenden Korrektur des Beleuchtungseinflusses verwendet werden könnte. Beispielhaft für ein solches Modell kann das Modell von Buchsbaum (1980) stehen. Buchsbaum entwickelt ein mathematisch beschreibbares Modell, das aus drei am Beginn des Modells stehenden Farbfiltern - äquivalent zu den Zapfensensitivitätsfunktionen - und zwei wesentlichen Phasen besteht. In der ersten Phase wird die Beleuchtungsschätzung durchgeführt. Hierbei bilden die einzelnen Oberflächen der visuellen Szene den retinalen Input. Über den gesamten retinalen Input wird ein räumlich gewichtetes Mittel gebildet. In den Gewichtungsfaktor gehen nach Buchsbaum beispielsweise die Größe der einzelnen Oberflächen, ihre Distanz zum räumlichen Zent-

³¹ Hyperspektralbilder sind Aufnahmen, bei denen für jedes Pixel ein Vektor mit der spektralen Oberflächenreflektanzfunktion dieses Pixels zur Verfügung steht.

rum des Sehbereichs oder andere räumliche Anordnungsmerkmale ein. Um zur Beleuchtungsschätzung zu gelangen, wird das gewichtete Mittel des retinalen Inputs mit einem festen internen Standard verglichen, welcher unabhängig von der aktuellen Szene ist. Von diesem internen Standard nimmt Buchsbaum an, dass er die durchschnittliche Oberflächenreflektanz der visuellen Szene adäquat repräsentiert. Da der interne Standard als adäquate Repräsentation der durchschnittlichen Oberflächenreflektanz angenommen wird, lässt sich somit der Beleuchtungsanteil schätzen, indem das gewichtete Mittel um den internen Standard bereinigt wird. Ergebnis dieser ersten Phase ist damit eine Beleuchtungsschätzung. Diese wird nun in der zweiten Phase verwendet, um jede Oberfläche des retinalen Inputs um den Beleuchtungsanteil zu korrigieren und so zu einer Schätzung der Oberflächenreflektanzen zu gelangen. Da Buchsbaum mit einem internen Standard arbeitet, welcher die durchschnittliche Oberflächenreflektanz repräsentiert, wird dieses Modell oftmals als typischer Vertreter der *grey world assumption* betrachtet (Smithson, 2005). Die *grey world assumption* geht davon aus, dass für jede visuelle Szene der Durchschnitt aller Oberflächenreflektanzen eine Chromatizität ergibt, die einem grau entspricht. Durch diese Annahme wird ein Standard für die mittlere Oberflächenreflektanz einer Szene gebildet, sodass die Abweichung von diesem Standard, der Beleuchtung zugeordnet werden kann (MacLeod, 2003). Streng genommen entspricht Buchsbaums interner Standard nicht zwangsweise einem Grau, jedoch passt die interne Logik von Buchsbaums Modell sehr gut zur Logik der *grey world assumption*. Kritik an der *grey world assumption* ergibt sich insbesondere aus Simulationen (Webster & Mollon, 1997), die zeigen, dass die Eingangsannahme einer im Mittel grauen Chromatizität der Oberflächen der visuellen Szene für die meisten Szenen nicht plausibel ist. Jedoch geht diese Forderung der *grey world assumption* über die Mindestanforderungen, um Farbkonstanz zu ermöglichen, hinaus.

Unproblematisch ist der chromatische Mittelwert als Beleuchtungsschätzer jedoch nicht, da sich in ihm ebenso die Chromatizität der Oberflächen widerspiegelt. So ist es möglich, dass eine beispielsweise aus rötlichen Oberflächen bestehende Szene unter neutraler Beleuchtung denselben chromatischen Mittelwert hat, wie eine neutrale Szene unter rötlicher Beleuchtung. Mit Buchsbaums (1980) Modell würde man in beiden Fällen jedoch zur selben Beleuchtungsschätzung gelangen. Nimmt man nun die realistische Annahme hinzu, dass sich die Oberflächen, aus denen sich die Szenerie zusammensetzt, ändern, beispielsweise indem Gegenstände hinzukommen oder durch einen veränderten Blickwinkel Oberflächen verdeckt werden oder außerhalb des Gesichtsfeldes liegen, wären zumindest geringfügige Veränderungen des mittleren Oberflächenreflektanz zu erwarten. Golz (2005) zeigt durch eine Analyse, dass die chromatischen Mittelwerte verschiedener Szenen unter einer Beleuchtung nennens-

werte Varianz aufweisen und somit nicht konstant sind. Dies kann als Hinweis darauf gewertet werden, dass der chromatische Mittelwert als alleiniger Hinweisreiz auf die Beleuchtung nicht ausreichend ist.

Die Sensitivitätsanpassung im von-Kries-Modell bei konstanten Oberflächen, die Verschiebung des chromatischen Mittelwertes sowie die Invarianz der Zapfenerregungsverhältnisse - als Konsequenz der linearen Veränderung der Zapfenerregungen - sind drei Größen, die inhaltlich zu völlig unterschiedlichen theoretischen Analyseebenen zur Erklärung von Farbkonstanz gehören. Mathematisch jedoch beziehen sie sich alle auf die gleiche Regularität im veränderten Rezeptorinput bei einer Veränderung der Chromatizität der Beleuchtung.

2.3.2 Regularitäten unterschiedlicher Aggregationsebenen: Chromatizitätsabhängige Luminanzverschiebungen und Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation

Da die alleinige Verwendung des chromatischen Mittelwerts zur Schätzung der Beleuchtung problembehaftet ist, wurde untersucht, ob weitere, sogenannte Szenenstatistiken 2. Ordnung, zusätzliche Informationen zur Beleuchtungsschätzung zur Verfügung stellen, und ob diese Informationen vom visuellen System als cues zur Beleuchtungsschätzung verwendet werden (Golz, 2005; Golz & MacLeod, 2002; MacLeod & Golz, 2003; Mausfeld & Andres, 2002)³².

Verschiedene Szenenstatistiken 2. Ordnung wurden untersucht. So untersuchten Mausfeld und Andres (2002) die Varianz als potentiellen Hinweisreiz für die Beleuchtungsschätzung. Dem ging die Beobachtung voraus, dass mit zunehmender Entfernung der Chromatizität einer Beleuchtung von begrenzter Bandbreite vom Weißpunkt die chromatische Varianz in einer visuellen Szene abnimmt. Die empirische Prüfung der Frage, ob die Varianz vom visuellen System als Hinweisreiz genutzt wird, unterstützt die Überlegungen von Mausfeld und Andres. MacLeod und Golz (2003; Golz, 2005) untersuchten eine Vielzahl chromatischer Szenenstatistiken. Hierzu zählen die Korrelation zwischen Luminanz und Rötlichkeit, die Korrelation zwischen Luminanz und Bläulichkeit, die Korrelation zwischen Rötlichkeit und Bläulichkeit, sowie die Rolle der Varianz und Schiefe einer chromatischen Verteilung. In ihren Untersuchungen zeigte sich, dass die Korrelation zwischen Luminanz und Rötlichkeit als vielversprechendster Hinweisreiz zu sehen ist.

³² Um die komplexen Sachverhalte in griffigen Begriffen zu erläutern, werden sprachliche Verknappungen eingesetzt. So wird beispielsweise von rötlicher Beleuchtung oder rötlichen Oberflächen gesprochen, womit Beleuchtungen gemeint sind, die viel Energie im langwelligen Bereich des Spektrums haben, sowie Oberflächen, die insbesondere langwelliges Licht reflektieren.

2.3.2.1 *Chromatizitätsabhängige Luminanzverschiebungen – Veränderungen im Farbsignal einzelner Oberflächen*

Golz und MacLeod (2002) bzw. Golz (2005) untersuchten zunächst die Veränderungen der Farbsignale – also des von den Oberflächen reflektierten Lichts – einer Szene, wenn die Beleuchtung verändert wird. Hierzu verwendete Golz Hyperspektralbilder natürlicher Szenen und simulierte Beleuchtungswechsel zwischen exemplarischen natürlichen Beleuchtungen, die ausgewählte natürliche Beleuchtungssituationen, nämlich eine neutrale (7000 K), eine bläuliche (20000 K) und eine rötliche Beleuchtung (4000 K) repräsentierten. Üblicherweise werden zur Darstellung etwaiger systematischer Veränderungen grafische Mittel genutzt.

Golz (2005) untersuchte Luminanzveränderungen des bei einem Beleuchtungswechsel zum Auge reflektierten Lichts in Abhängigkeit von der Rötlichkeit der Oberflächen, die für diesen Zweck unter neutraler Beleuchtung dargestellt wurden. Dabei stellte er fest, dass bei rötlicher werdender Beleuchtung rötliche Oberflächen hauptsächlich Luminanz gewinnen, während bläuliche und grünliche Oberflächen dunkler werden. Es entsteht somit eine chromatizitätsabhängige Luminanzverschiebung, die sich durch die Regel „when the light gets red, the reds get lighter“ (Golz, 2005, S. 49) beschreiben lässt. Dies bedeutet, *je höher der l - Wert einer homogenen Oberfläche, umso höher deren Zunahme der Luminanz bei rötlicher werdender Beleuchtung.*

Untersucht man auch die s - Achse bei einem Beleuchtungswechsel von einer bläulichen Beleuchtung auf eine rötliche Beleuchtung, so kommt es bei Pixeln mit hohen s - Werten zur höchsten Luminanzabnahme, eine Beobachtung, die auf Szenenebene durch die Luminanz-Bläulichkeits-Korrelation erfasst werden kann (Golz, 2005). Beide chromatizitätsabhängigen Luminanzverschiebungen gemeinsam werden im Folgenden unter dem Begriff Chromatizitäts-Intensitäts-Änderung zusammengefasst (vgl. Kapitel 5). Golz beschrieb das Ausmaß dieser beiden Veränderungen mit wenigen Prozent (bezogen auf die absoluten Luminanzwerte), setzte diese jedoch in Relation zu den insgesamt sehr geringen Abweichungen von der vollständigen Normalisierbarkeit auf der Luminanzachse, wodurch deutlich wurde, dass es sich bei der Chromatizitäts-Intensitäts-Änderung, um die Hauptquelle der Streuung handelt.

2.3.2.2 *Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation - eine Szenenstatistik 2. Ordnung*

Aus der Überlegung heraus, dass der direkte Vergleich einer einzelnen Oberfläche, bzw. in den Simulationen eines einzelnen Pixels, vor und nach einer Beleuchtungsänderung in alltäglichen Situationen oftmals nicht möglich ist, entwickelten Golz und MacLeod (2002) die These, dass das Wahrnehmungssystem auf andere Informationen des retinalen Inputs zurückgreife, nämlich auf über die gesamte Szene hinweg gebildete chromatische Szenenstatistiken. Zunächst soll nun die Luminanz-Rötlichkeits-

Korrelation (*LRK*), den Darstellungen von Golz und MacLeod (2002), Golz (2005) und MacLeod und Golz (2003) folgend, vorgestellt werden. Im Anschluss werden die Ergebnisse der empirischen Prüfung vorgestellt.

Chromatische Szenenstatistik. Die oben beschriebene Analyse einzelner Oberflächen legt die Vermutung nahe, dass eine über die gesamte Szene gebildete Korrelation zwischen Luminanz und Rötlichkeit, solch ein geeigneter Indikator für die Beleuchtungsfarbe sein könnte. Untersuchungen von Golz und MacLeod (2002) zeigen jedoch, dass die Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation als alleinige Größe zur Schätzung der Beleuchtung ungeeignet ist. So zeigt sich in ihren Simulationsarbeiten, dass die Korrelation zwischen Luminanz und Rötlichkeit größtenteils unabhängig von der vorherrschenden Beleuchtungsbedingung ist (Golz, 2005; Golz & MacLeod, 2002).

Verwendet man die Korrelation zwischen Luminanz und Rötlichkeit jedoch als bedingte Größe, erlangt sie beachtenswerten diagnostischen Wert (Golz & MacLeod, 2002). In Verbindung mit dem chromatischen Mittelwert ist die Korrelation zwischen Luminanz und Rötlichkeit sehr wohl ein nützlicher Hinweisreiz für die Beleuchtungsschätzung. Hierbei ist ein spezifischer Aspekt des chromatischen Mittelwerts bedeutsam: dessen Rötlichkeit. Das Prinzip soll an einem fiktiven Beispiel verdeutlicht werden (Abbildung 2.1). Nimmt man eine Anzahl visueller Szenen unter einer Beleuchtung I und ordnet diese Szenen im Hinblick auf ihre mittlere Rötlichkeit und betrachtet dann dieselbe Auswahl an Szenen, nun aber unter einer rötlicheren Beleuchtung II, so zeigt sich, dass ein Überschneidungsbereich zwischen beiden Clustern entsteht. In diesem Bereich ist die mittlere Rötlichkeit nutzlos, um zwischen den rötlichsten Szenen des Sets unter Beleuchtung I und den am wenigsten rötlichen Szenen unter der rötlicheren Beleuchtung II zu trennen. Wird nun jedoch die Korrelation zwischen Luminanz und Rötlichkeit hinzugezogen, entsteht die Möglichkeit, zwischen beiden Clustern zu trennen. Das bedeutet, sind zwei Szenen mit derselben mittleren Rötlichkeit des proximalen Reizes gegeben, gibt die Korrelation von Luminanz und Rötlichkeit bei der Schätzung der Beleuchtung eine zusätzliche Information, die es ermöglicht, die Ambiguität aufzulösen³³. Die chromatische Regularität, welche

³³ Betrachtet man die Szenen unter einer Beleuchtung genauer (z. B. in Abbildung 2.1 die Szenen unter Beleuchtung I [Δ]), wird deutlich, dass auch innerhalb dieser Gruppe von Szenen einige Szenen trotz gleichen chromatischen Mittelwerts verschiedene *LRK* aufweisen. Der umgekehrte Fall ist ebenfalls denkbar. Angenommen, es wird eine weitere Beleuchtung Ib, welche in ihrer Qualität Beleuchtung I viel ähnlicher ist als Beleuchtung II, in die schematische Darstellung aufgenommen. In diesem Fall kann angenommen werden, dass die Punktwolke unter Beleuchtung I und die Punktwolke unter Beleuchtung Ib nicht mehr disjunkt wären, sondern deutliche Überschneidungen aufwiesen. Es ist davon auszugehen, dass in diesen Fällen der bessere Schätzer gewählt wird. Der bessere bzw. optimale Schätzer für eine

durch die Korrelation von Luminanz und Rötlichkeit beschrieben wird, ist die, dass sich eine hauptsächlich rötliche Szene unter neutraler Beleuchtung anders auf die Höhe der Korrelation zwischen Luminanz und Rötlichkeit auswirkt als eine neutrale Szene unter rötlicher Beleuchtung.

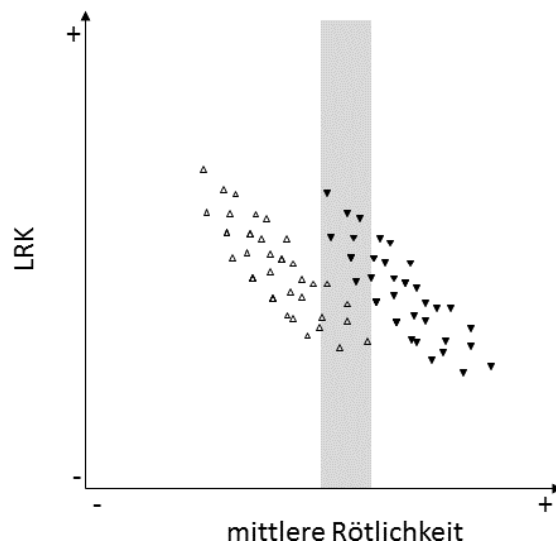


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung eines fiktiven Sets verschiedener Szenen unter zwei möglichen Beleuchtungen. Weiße Dreiecke stehen für die Szenen des fiktiven Sets unter Beleuchtung I, ausgefüllte Dreiecke stehen für dieselben Szenen des fiktiven Sets unter Beleuchtung II. Der graue Bereich kennzeichnet den Bereich in dem sich die Sets im Hinblick auf die mittlere Rötlichkeit des proximalen Reizes einer Szene überschneiden, wodurch ein Ambiguitätsbereich entsteht, innerhalb dessen die Rötlichkeit des chromatischen Mittelwerts nicht mehr genügt, um zwischen Szenen unter Beleuchtung I und Szenen unter Beleuchtung II zu unterscheiden. Nimmt man jedoch die Korrelation zwischen Luminanz und Rötlichkeit hinzu, lassen sich zwei Cluster bilden und die Szenen einer der Beleuchtungen zuordnen.

spezifische Szene das unter einer spezifischen Beleuchtung ist immer der Schätzer, mit dem bei der Schätzung das geringste Residuum entsteht. In der Konsequenz bedeutet das ebenfalls, dass für eine spezifische Kombination aus Beleuchtung und chromatischem Mittelwert eine eindeutige Zuordnung auf Basis einer Schätzung geleistet wird. Mit welcher Sicherheit eine solche Schätzung vorgenommen werden kann, hängt wiederum von der Enge des Zusammenhangs zwischen mittlerer Rötlichkeit und *LRK* ab. Ist dieser Zusammenhang nur sehr klein, ergibt sich daraus eine flachgipflige Wahrscheinlichkeitsverteilung zur Beschreibung der Sicherheit der Schätzung. Ist der Zusammenhang sehr eng, die Punktwolke also sehr schmal und somit eng um den Schätzer verteilt, ergibt sich eine höhere Sicherheit. Abschließend soll nochmals daran erinnert werden, dass der Mittelwert und die *LRK* gemeinsam einen guten Hinweis auf die Beleuchtung bieten, sie jedoch bei weitem nicht die einzigen cues in natürlichen Szenen sind.

Golz und MacLeod (2002) führen den zwischen mittlerer Rötlichkeit aufgrund rötlicher Beleuchtung und mittlerer Rötlichkeit aufgrund einer großen Anzahl rötlicher Oberflächen in der Szene differenzierenden Effekt der Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation auf Sensitivitätsunterschiede der Zapfen in verschiedenen Bereichen des Spektrums zurück. Die Logik ist dabei folgende: Der normalfarbsichtige Mensch ist für Licht aus dem mittleren Wellenlängenbereich sensitiver als für Licht aus dem kurz- oder langwelligen Bereich. Bei einer rötlichen Beleuchtung wird die, im Vergleich zum mittelwelligen Bereich, geringere Sensitivität der Zapfen im langwelligen Bereich des sichtbaren Spektrums, durch die im langwelligen Bereich höhere Energie der Beleuchtung kompensiert, sodass das von rötlichen Oberflächen reflektierte Farbsignal im proximalen Reiz eine höhere Luminanz hat. Diese im Vergleich zu einer neutralen Beleuchtung selektive Erhöhung der Luminanz rötlicher Oberflächen ist in einer positiven Korrelation zwischen Luminanz und Rötlichkeit repräsentiert.

Um die gleiche mittlere Rötlichkeit unter neutraler oder weniger rötlicher Beleuchtung zu erreichen, muss eine Szene einen größeren Anteil rötlicher Oberflächen enthalten im Vergleich zu der Szene unter rötlicher Beleuchtung, damit beide die gleiche mittlere Rötlichkeit aufweisen. Bei Szenen unter neutraler Beleuchtung reflektieren neutrale und moderat grünliche und rötliche Oberflächen das meiste Licht. Zudem sind die Zapfen für diesen Bereich besonders sensitiv, wodurch sich für Farbsignale aus diesem Bereich die höchste Luminanz erwarten lässt. Daraus ergibt sich die Konsequenz, dass in dieser Situation für rötliche Oberflächen keine Kompensation stattfindet, sondern diese auf Grund der spektralen Sensitivitätseigenschaften der Fotorezeptoren eine geringere Luminanz aufweisen. Die zu erwartende Auswirkung auf die Korrelation zwischen Luminanz und Rötlichkeit besteht in einer Verringerung der Korrelation bzw. in einer negativen Korrelation zwischen Luminanz und Rötlichkeit (vgl. Golz & MacLeod, 2002).

Dieses Bild, dass Szenen mit einem größeren Anteil rötlicher Oberflächen bei einer gegebenen mittleren Rötlichkeit eine geringere *LRK* aufweisen als Szenen, deren mittlere Rötlichkeit durch eine stärker rötliche Beleuchtung zustande kommt, lässt sich auch beim Vergleich verschiedener Szenen unter der gleichen Beleuchtung beobachten. Nimmt man verschiedene Szenen und vergleicht die Korrelation von Luminanz und Rötlichkeit unter der gleichen Beleuchtung, so zeigen die Szenen mit einem größeren Anteil rötlicher Oberflächen eine höhere mittlere Rötlichkeit und eine geringere Korrelation von Luminanz und Rötlichkeit (MacLeod & Golz, 2003).

2.3.2.2.1 Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation als Hinweisreiz für die Beleuchtungsschätzung

Empirische Prüfung. Da die Simulationsergebnisse die Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation als chromatische Regelmäßigkeit im proximalen Reiz etablierten, stellt sich die Frage, ob das visuelle System diese chromatische Regelmäßigkeit als cue zur Beleuchtungsschätzung heranzieht. Diese Frage haben Golz und MacLeod eingehend untersucht (Golz, 2005, 2008; Golz & MacLeod, 2003, 2002). Hierzu zeigte Golz (2005) seinen Versuchspersonen Seuratstimuli (Mausfeld & Andres, 2002), welche aus kleinen farbigen Scheiben ohne semantischen Gehalt bestehen und in ihrer Farbigkeit den geforderten experimentellen Eigenschaften entsprachen. Erfasst wurde die Wirkung der *LRK*, indem die Versuchspersonen nach dem Explorieren des Seuratstimulus in einem zentral dargebotenen Testfeld Graueinstellungen vornahmen. Golz zeigte, dass die achromatischen Einstellungen der Testfelder systematisch mit der Ausprägung der *LRK* variierten. Hierbei zeigte sich insbesondere zwischen hohen positiven *LRK* und *LRK* von Null bzw. stark negativen *LRK* ein großer Unterschied zwischen den Graueinstellungen (jedoch, vergleicht man die Ausprägungen dieses Unterschieds mit dem Unterschied zwischen den Graueinstellungen von Nullkorrelationen und negativen *LRK* miteinander, so zeigt sich bei etwa der Hälfte der Versuchspersonen eine deutlich geringere Veränderung der Graueinstellung (Golz, 2005, Experiment 1)). In einem weiteren Experiment (Golz, 2005, Experiment 2) konnte gezeigt werden, dass sich dieser Befund auch auf andere mittlere Chromatizitäten der Seuratstimuli generalisieren lässt, und somit unabhängig von dem in Experiment I gewählten Seuratstimuli mit neutralem chromatischem Mittelwert ist.

Granzier, Brenner, Cornelissen und Smeets (2005) untersuchten die Größe, die für die Etablierung der *LRK* integrierten Bereichs der visuellen Szene, mit Hilfe von Graueinstellungen eines Testfeldes. Hierzu wurde das Umfeld in einen direkt an das Testfeld angrenzenden inneren und einen wiederum an diesen angrenzenden äußeren Bereich unterteilt, wobei beide Umfeldbereiche sich nur im Hinblick auf die *LRK* unterschieden. Zur Untersuchung der Fragestellung wurde die Größe des inneren Umfeldbereichs zwischen einer Fläche von 1° Sehwinkel und der gesamten Fläche variiert. Hierbei betrachteten sie die Differenz der Einstellungen zwischen einer hohen positiven *LRK* im direkten Umfeld und einer stark negativen *LRK* im direkten Umfeld um das Testfeld. Ihre Ergebnisse zeigen dabei, dass sich mit zunehmender Größe des inneren Umfeldbereichs die Differenzen nicht nennenswert veränderten, woraus die Autoren schlussfolgerten, dass es nicht unbedingt notwendig sei, von einer Integration über die gesamte Szene auszugehen, die sie in der Arbeit von Golz und MacLeod (2002) jedoch als implizit angenommen sahen. Zudem folgern sie, dass die

Annahme einer Integration in einem lokal eng begrenzten Bereich, zu Verzerrungen bei der Beleuchtungsschätzung führen würde, weshalb sie die Interpretation der *LRK* als Fall chromatischer Induktion für angemessener halten. Ihr pointiertes Fazit ist damit, dass die *LRK* kein hilfreicher cue ist, der zur Beleuchtungsschätzung beiträgt, da dieser in einem sehr eng um das Testfeld begrenzten Bereich etabliert wird.

Golz (2008) griff diese Befunde auf und untersuchte sie im Hinblick auf methodisch verursachte Störgrößen, wie salienten Grenzen zwischen dem inneren und dem äußeren Umfeldbereich und dem Einfluss der Größe der Farbelemente im Umfeldbereich und konnte einen Einfluss dieser beiden Variablen empirisch nachweisen. Somit kann der Befund von Granzier et al. (2005), dass die maximale Wirkung der *LRK* schon bei einem relativ kleinen inneren Umfeld erreicht wird, anhand dieser Störvariablen erklärt werden. So könnte die saliente Grenze beispielsweise zu einer lokalen Beleuchtungsschätzung geführt haben (Golz, 2008), ein Konzept, das auch bei Smithson und Zaidi (2004) diskutiert wird. Konkret erreichte die *LRK* bei Golz Reproduktion des Experiments³⁴ 75% ihrer Wirkung bei einer Breite des inneren Umfeldes von 4.3° Grad Sehwinkel, gemittelt über alle Teilnehmer.

2.3.3 Komplexe Umweltinformationen und direkte Beleuchtungsinformationen

Neben chromatischen Szenenstatistiken stehen dem Wahrnehmungssystem noch verschiedene andere Hinweisreize zur Verfügung, um ein farbkonstantes Perzept zu etablieren. Untersucht wurden die direkte Betrachtung der Beleuchtung, das Vorhandensein von Referenzoberflächen, die Wahl der hellsten Oberfläche im visuellen Input als weiß, Glanzlichter sowie Schatten und wechselseitige Reflexionen. Einen Überblick über diese cues zur Beleuchtungsschätzung bietet Smithson (2005). An dieser Stelle sollen exemplarisch ausgewählte cues erläutert werden.

Eine naheliegende Möglichkeit, um das, mathematisch betrachtet, unterbestimmte Problem der Trennung von Beleuchtungs- und Oberflächeneigenschaften einzugrenzen, ist das Einschränken der Beleuchtungsfarbe auf natürliche Beleuchtungseigenschaften (siehe Abschnitt 1.5). Die Farbe natürlicher Beleuchtungen charakterisieren Delahunt und Brainard (2004) als zwischen Blau und Gelb variierend. In ihrer Untersuchung, in der sie die erreichte Farbkonstanz bei achromatischen Einstellungen unter Beleuchtungen, die in ihrer Chromatizität natürlichen Beleuchtungen ähneln und Beleuchtungen die in ihrer Chromatizität natürlichen Beleuchtungen nicht ähneln,

³⁴ Die Bedingungen dieses Experiments ähneln den bereits vorgestellten von MacLeod und Golz (2002) und Golz (2005). In diesem Experiment (Golz, 2008) wurde das innere Umfeld als ringförmiger Bereich um das Testfeld gelegt. Die Breite des ringförmigen Bereichs beschreibt die Distanz von der Grenze des Testfeldes bis zur äußeren Grenze des inneren Umfeldes.

vergleichen, zeigen sich jedoch keine Vorteile für Beleuchtungen, die in ihrer Chromatizität natürlichen Beleuchtungen ähnlich sind.

Eine weitere Möglichkeit der Beleuchtungsschätzung, ohne dass die Lichtquelle direkt beobachtbar ist, wäre die Schätzung anhand einer Referenzoberfläche, eine Möglichkeit, die in verschiedenen technischen Anwendungen zum Einsatz kommt. Wäre dem Beobachter bekannt, dass eine bestimmte Oberfläche dauerhaft präsent bliebe, ließe sich die Beleuchtung anhand der Veränderung des Farbsignals, das sich auf diese Oberfläche bezieht, schätzen. Zaidi (1998) stellt einen Algorithmus vor, bei dem für die Beleuchtungsschätzung nur ein Teil der Oberflächen einer Szene bekannt sein muss. Die kritische praktische Frage, die sich jedoch stellt ist, ob zu jeder Zeit eine solche Standardoberfläche im zu einer Beleuchtungsbedingung gehörenden Bereich einer visuellen Szene vorhanden ist.

Einen weiteren Hinweisreiz für die Beleuchtungsschätzung stellen *wechselseitige Reflexionen* (*mutual reflections*) dar. Das sind Reflexionen, die dadurch entstehen, dass Licht, das von einer Oberfläche reflektiert wurde, auf eine andere Oberfläche fällt, beispielsweise in den Ecken von Räumen. Bloj, Kersten und Hurlbert (1999) zeigten in einem einfachen Experiment die Auswirkungen solcher Wiederreflexionen mit Hilfe einer chromatischen Machkarte. Die eine Hälfte der Doppelkarte war magentafarben gestrichen, die andere weiß. Die Versuchspersonen betrachteten die konkav aufgestellte Karte unter isolierten Beleuchtungsbedingungen und in einer zweiten Bedingung durch ein Pseudoskop, sodass die konkav aufgestellte Karte konvex wirkte. Die von den Versuchspersonen ausgewählte Farbe für die weiße Seite unterschied sich in beiden Bedingungen deutlich. Bloj et al. schlussfolgerten, dass aufgrund der Wahl des Versuchsaufbaus nur eine mögliche Interpretation der Ergebnisse möglich sei, nämlich dass das visuelle System mit wechselseitigen Reflexionen aufgrund der räumlichen Geometrie umgehen kann.

2.3.4 Zwischenfazit

Adaptationale und Beleuchtungsschätzungsansätze unterscheiden sich in einem zentralen Punkt: in ihrem Umgang mit der Beleuchtungskomponente. So gehen adaptationale Ansätze von einer Neutralisierung oder Eliminierung des Beleuchtungseinflusses aus, während Beleuchtungsschätzungsansätze eben nicht von einer Eliminierung dieser Information ausgehen, sondern stattdessen eine Schätzung annehmen. Somit bieten sie potentiell die Möglichkeit, dass Informationen über die Beleuchtung dem visuellen System für etwaige andere Prozesse zur Verfügung gestellt werden könnten. Vermeintlich einfache und auch auf physiologischer Ebene einfache Lösungen für das Farbkonstanzproblem machen einen großen Teil der Attraktivität adaptationaler Lösungsansätze aus. Ein vielzitiertes Beispiel von Katz, das die Stärke von Beleuchtungs-

schätzungsansätzen zeigt, weist auch gleichzeitig auf die Grenzen streng distal argumentierender adaptationaler Ansätze, wie beispielsweise dem von-Kies-Ansatz hin:

„Paradoxical as it may at first sound, such a thoroughgoing efficiency on part of the adaptive mechanisms as Hering postulates is not even to be considered as desirable; for it would partially or wholly compensate for any change in illumination, and thereby make it imperceptible“ (Katz, 1935, zitiert nach Smithson, 2005, S. 1341).

In der gegenwärtigen Farbkonstanzforschung ist weitgehend akzeptiert, dass die Lösung des Farbkonstanzproblems nicht allein in simplen peripheren Prozessen zu finden ist. Ob hierzu eine Beleuchtungsschätzung nötig ist, oder andere Lösungswege zu bevorzugen sind, ist jedoch Gegenstand aktueller Diskussionen (Granzier, Brenner, & Smeets, 2009; Smithson & Zaidi, 2004). Ebenso kommt es in den aktuellen Diskussionen zu einer engen Parallelisierung psychophysikalischer und physiologischer Ergebnisse.

Was die Forschung aus der adaptationalen und der Beleuchtungsschätzungsperspektive jedoch verbindet, ist die Konzentration auf die gleiche zentrale Regularität im visuellen Input bei einer Beleuchtungsveränderung, nämlich auf ein gemitteltes Maß (vgl. Abschnitt 2.3.1). Dass das visuelle System zur Lösung des Farbkonstanzproblems jedoch eine ganze Reihe von cues heranzieht, zeigt eine Untersuchung von Kraft und Brainard (1999) deutlich. In ihrem Experiment verglichen sie die drei zu diesem Zeitpunkt führenden Ideen zur Farbkonstanz: die Erklärungen, dass Farbkonstanz über eine Adaptation an die lokale Umgebung, das chromatische Mittel der Szene oder die intensivste Region der visuellen Szene, zu Stande kommt. Hierzu variierten sie sowohl die Oberflächen als auch die Beleuchtungen einer natürlichen Szene mittlerer Komplexität gezielt, um den Einfluss der jeweils zentralen Variable dieser Erklärungsansätze zu testen. Ihre Ergebnisse zeigen, dass alle drei Ansätze zur Farbkonstanz beitragen, jedoch keiner dieser drei Ansätze allein, noch eine Kombination aus lokalem Kontrast und dem chromatischen Mittel der Szene oder einer Kombination aus lokalem Umfeld und hellster Region der visuellen Szene als vollständige Erklärung für Farbkonstanz ausreichen. Kraft und Brainards Arbeit unterstützt damit die Idee, dass eine Vielzahl möglicher Informationen, angefangen von Szenenstatistiken erster Ordnung bis hin zu wechselseitigen Reflektionen vom visuellen System verwendet werden, um ein annähernd farbkonstantes Perzept zu erreichen. Abschließend ist anzumerken, auch wenn Kraft und Brainard die untersuchten Mechanismen in einen adaptationalen Zusammenhang einbetten, diese aber einen Beleuchtungsschätzungskontext durchaus unterstützen. Dass das Erreichen von Farbkonstanz eine

komplexe Leistung des Wahrnehmungssystems ist, zeigt sich zudem darin, dass auch kognitive Leistungen, wie die im Gedächtnis verankerte Farbe als Eigenschaft eines Objektes Einfluss auf die wahrgenommene Farbe eines Objekts haben (Hansen, Olkonen, Walter, & Gegenfurtner, 2006).

2.4 Temporale Informationsintegration

Der temporalen Informationsintegration liegt die theoretische Vorstellung zu Grunde, dass eine zeitliche Analyse visueller Informationen stattfindet, indem eine Sequenz von Reizen analysiert wird, die alle am selben Ort der Retina (z. B. auf der Fovea) auftrafen. Metaphorisch könnte man von einem Zeitfenster in die Vergangenheit sprechen. Die Idee der zeitlichen Informationsintegration ist nicht neu, sondern wurde in der Vergangenheit immer wieder geäußert (D’Zmura & Lennie, 1986; Fairchild & Lennie, 1992). Räumliche Informationsintegration könnte in eine zeitliche Informationsintegration überführt werden, wenn beispielsweise eine Folge sukzessiv fixierter Punkte über einen Zeitraum hinweg analysiert wird. Das Analyseergebnis kann dann wiederum für eine Beleuchtungsschätzung herangezogen werden. D’Zmura und Lennie (1986) implementieren diese Überlegungen in ihrem computationalen Modell, um Farbkonstanz mit Hilfe von einfachen Adaptationsprozessen zu erklären. Zwei Aspekte sind im Hinblick auf die zeitliche Integration besonders interessant. Zum einen die Frage, welche Informationen das visuelle System bei der temporalen Analyse nutzt, um einen Oberflächenfarbeindruck zu generieren. Zum anderen die Frage, welche Eigenschaften ein solcher Integrationsprozess hat, eine interessante Frage insbesondere im Hinblick darauf, wie das visuelle System im Rahmen der Integration mit Beleuchtungswechseln umgeht.

2.4.1 Zeitliche Aspekte chromatischer Adaptation

Chromatische Adaptation definiert Werner (2014) als eine Anpassung des chromatischen Systems an die vorherrschenden Licht- und Kontrastverhältnisse, die sowohl temporale als auch räumliche Informationsverarbeitungsprozesse umfasse und welche die sensorische Komponente der Farbkonstanz darstelle. Typisch für diese Untersuchungsperspektive ist die enge Verknüpfung psychophysikalischer Ergebnisse mit physiologischen Korrelaten, wobei hier zwischen direkt auf Rezeptor- oder retinaler Ebene basierenden Verarbeitungsprozessen, wie sie das von Kries-Modell impliziert (vgl. Abschnitt 2.2.1) und komplexen kortikalen Verarbeitungsprozessen unterschieden wird.

Psychophysikalische Untersuchungen weisen darauf hin, dass chromatische Adaptation auf mehreren Prozessen mit jeweils verschiedenen Zeitverläufen beruht (Fairchild & Lennie, 1992; Fairchild & Reniff, 1995; Rinner & Gegenfurtner, 2000; Werner,

Sharpe, & Zrenner, 2000; und für einen Überblick Werner, 2014). Fairchild und Reniff (1995) ließen die Graueinstellung eines Testfeldes über die Zeit hinweg von ihren Versuchspersonen korrigieren und passten an die Graueinstellungen Exponentialfunktionen an, wobei eine gute Abbildung der Datenlage nur durch die Verwendung zweier Exponentialfunktionen möglich war. Aus diesem Ergebnis leiteten Fairchild und Reniff die Schlussfolgerung ab, dass chromatische Adaptation bei konstanter Luminanz auf zwei Prozessen basiert, einem schnellen von wenigen Sekunden und einem langsameren von circa einer Minute. Rinner und Gegenfurtner (2000) ergänzen die Arbeit von Fairchild und Reniff in zwei Punkten. Zum einen untersuchen sie den zeitlichen Verlauf chromatischer Adaptation in zwei verschiedenen experimentellen Paradigmen: einer Diskriminationsaufgabe (*color discrimination task*) und einer Klassifikationsaufgabe (*color appearance task*). Zum anderen reduzierten sie die Darstellungszeiten und setzten damit einen deutlich früheren Meßzeitpunkt. Die so gewonnenen Ergebnisse weisen für beide Untersuchungsparadigmen auf einen langsamen Adaptationsprozess, mit einer Halbwertszeit von ca. 20 s und einen schnellen Adaptationsprozess mit einer Halbwertszeit von ca. 40-70 ms hin. Zusätzlich weisen die Daten auf einen dritten, extrem schnellen Prozess mit einer Halbwertszeit von weniger als 10 ms hin, der jedoch nur in der Graueinstellungsaufgabe nachweisbar war. Dies und der Vergleich mit den Ergebnissen von Fairchild und Reniff verdeutlichen den Einfluss des Untersuchungsparadigmas.

2.4.2 Mechanismen und Hinweisreize zeitlicher Informationsintegration bei der Beleuchtungsschätzung

In den bisherigen Arbeiten zur Untersuchung von Hinweisreizen, welche das visuelle System zur Beleuchtungsschätzung heranziehen könnte, wurde hauptsächlich der Nutzen dieser cues bei der räumlichen Integration visueller Information untersucht. Smithson (2005) weist jedoch darauf hin, dass die Rolle der temporalen Informationsintegration ebenfalls untersucht werden sollte. Die im Folgenden vorgestellten Arbeiten unterscheiden sich von den in Abschnitt 2.4.1 vorgestellten Untersuchungen nicht nur in einer Verschiebung des Fokus, weg von einer Beschreibung des Verlaufs des Adaptationsprozesses und hin zu einer Untersuchung der genutzten Hinweisreize, sie unterscheiden sich auch in methodischer Hinsicht, da sie mit einer Vielzahl unterschiedlicher, zeitlich sukzessiv präsentierter Farbfelder arbeiten.

Eine Untersuchung von Smithson und Zaidi (2004) deutet auf einen lokalen, temporalen Integrationsprozess hin. In einem Experiment zeigten sie den Versuchspersonen nacheinander ein Set von quadratischen Testfeldern, umgeben von einem Seurathintergrund. Hierbei waren der Hintergrund und die Testfelder unter verschiedenen Beleuchtungen simuliert, sodass die Ergebnisse zwischen räumlicher Integration des

Hintergrundes und temporaler Informationsintegration über mehrere Testfelder hinweg, differenzieren konnten. Die Klassifikationsaufgabe der Versuchspersonen bestand darin, die Farbe des Testfelds zu einer von zwei vorgegebenen Farbkategorien zuzuordnen. Die Ergebnisse, welche als Grenzbereiche zwischen zwei Farbkategorien dargestellt werden können, legen eine temporale Informationsintegration nahe, auch wenn die Farbkonstanzindizes im Vergleich zu einer ebenfalls erhobenen räumlichen Informationsintegrationsbedingung geringer sind. Ob dieser Prozess der temporalen Informationsintegration auf zentrale oder periphere neuronale Verarbeitung³⁵ zurückgeht, lässt sich aus methodischen Gründen nicht eindeutig festlegen. Smithson und Zaidi können einen räumlich lokalen Adaptationsprozess, der die Information mehrerer Sekunden integriert und möglicherweise sogar auf retinaler Ebene lokalisiert ist, als Erklärung nicht ausschließen. Jedoch stützen zusätzliche Untersuchungen die Überlegung, dass das visuelle System auch bei der temporalen Informationsintegration weitere Hinweisreize hinzuzieht um eine Beleuchtungsänderung von einer Veränderung der Oberflächen einer Szene zu unterscheiden. In einem weiteren Experiment reduzierten Smithson und Zaidi die Darstellungsdauer des Testfeldes, sodass das Testfeld nur noch in 13 % der Zeit eines Durchgangs dargestellt wurde, in der restlichen Zeit wurde das Hintergrundseurat unter einer vom Testfeld verschiedenen Beleuchtung dargestellt. Ein automatischer adaptiver Prozess, der auf einem retinalen Verarbeitungsniveau arbeitet, würde bei dieser Aufgabe keinen Beitrag zum Erreichen eines farbkonstanten Perzepts leisten, da die Informationen selektiv integriert werden müssen. Die Ergebnisse zeigen bei den Versuchspersonen schlechtere Farbkonstanzleistungen als im oben berichteten Experiment, jedoch kommt es bei zwei Versuchspersonen in einigen Bedingungen zu bemerkenswert hohen Farbkonstanzindizes, wie Smithson und Zaidi berichten. Dieses Ergebnis unterstützt Ansätze, die von komplexen Prozessen zur Generierung farbkonstanter Perzepte ausgehen. Als allgemeines Fazit dieser Experimente betonen Smithson und Zaidi, dass ihre Daten dafürsprechen, dass eine zeitliche Integration visueller Information stattfindet, um farbkonstante Perzepte zu erzeugen, und dass zu diesen Prozessen sowohl zentrale als auch periphere Mechanismen beitragen können.

Schultz, Doerschner und Maloney (2006) berichten ein weiteres Beispiel temporaler Informationsintegration zum Erreichen von Farbkonstanz, unter Einsatz einer anderen Meßmethode und einer anderen Stimulusdarstellung. In ihrer Untersuchung zeigten sie den Versuchspersonen Testfelder vor schwarzem Hintergrund und maßen den

³⁵ Die Begriffe zentrale und periphere Verarbeitung werden oft aus physiologischer Sicht verwendet. Lennie (1999) nutzt den Begriff zentrale Verarbeitung für cortikale Prozesse und betont insbesondere, dass diese zum momentanen Zeitpunkt weitaus unbekannter und unterschiedlicher sein können als die gut untersuchten retinalen Prozesse.

perzeptuellen Eindruck dieser Testfelder mit Hilfe einer *hue scaling technique*. Bei dieser Meßmethode hat die Versuchsperson die Aufgabe, jeweils den Grad der Rötlichkeit, Bläulichkeit, Grünlichkeit und Gelblichkeit eines Testfeldes mit Hilfe einer siebenstufigen Likert-Skala, mit den Polen ungesättigt und gesättigt, anzugeben. In einem nächsten Schritt wurden die Skalen der Gegenfarben kombiniert, wodurch zwei Skalen entstanden, durch die eine Lokalisation in einem Chromatizitätsdiagramm möglich wurde, und damit auch die Berechnung von Farbkonstanzindizes. Diese Ratings wurden für ein Set von aus Munsell-Chips ausgewählten Testfeldfarben erhoben, wobei die simulierte Beleuchtung, unter der die Testfelder präsentiert wurden, blockweise variiert wurde. Die Ergebnisse zeigten, dass die Einstellungen der Versuchspersonen nicht nur vom zu beurteilenden Testpatch abhingen sondern auch von den zuvor gezeigten Testfeldern. Die über alle Versuchspersonen ermittelten Farbkonstanzindizes bewegten sich in Abhängigkeit von der Beleuchtungsbedingung zwischen .38 für eine gelbliche Beleuchtung und .75 für eine bläuliche Beleuchtung. Beim Hinzufügen räumlicher Hinweisreize bleiben die ermittelten Farbkonstanzindizes stabil im Bereich zwischen .64 und .75, randomisiert man die Reihenfolge aller Durchgänge und eliminiert räumliche Hinweisreize, so sinken die Farbkonstanzindizes gegen Null, die Versuchspersonen nahmen also einen direkten proximalen Farbabweich vor.

Lee und Smithson (2012) untersuchten die temporale Informationsintegration zum Erreichen von Farbkonstanz in Szenen, in denen mehr als eine Beleuchtungsbedingung präsent ist. Hierbei konzentrierten sie sich auf die Rolle verschiedener cues, welche auf eine Beleuchtungsveränderung innerhalb der Szene hinweisen könnten. Zu diesen Hinweisreizen zählen sie die chromatischen Eigenschaften des Hintergrunds, die retinotopie Position der integrierten Information, sowie das Vorhandensein von Augenbewegungen. Diese Variablen variierten sie jeweils auf zwei disjunkten Stufen: ein für die Beleuchtungsschätzung informativer, weil unter derselben Beleuchtungsbedingung simulierter Hintergrund vs. ein unter einer anderen Beleuchtungsbedingung simulierter und somit nicht informativer Hintergrund; übereinanderliegende oder getrennte retinotopie Positionen der temporal zu integrierenden Informationen; Initiieren einer Augenbewegung oder konstantes Fixieren eines bestimmten Punktes. Untersucht wurde der Verlauf der temporalen Informationsintegration, indem die Versuchspersonen für jedes der direkt nacheinander eingeblendeten Testfelder eine Zuordnung zu einer von zwei möglichen Farbkategorien vornehmen mussten, wodurch für jede Bedingung und jedes Testfarbenset ein Punkt subjektiver Gleichheit berechnet werden konnte. Hierzu wurden zwei Testfarbensets gebildet, die sich nur im Hinblick auf ein Drittel der enthaltenen Testfarben unterschieden, hierdurch jedoch ein im Mittel rötlicheres und ein im Mittel grünlicheres Testfarben-

set entstanden. Die in den Testfarbensets enthaltenen Farben, welche auch für die Gestaltung des Hintergrunds mit Seuratmustern verwendet wurden, waren im Hinblick auf ihre MacLeod-Boynton *Luminanz* und *s*-Werte (Abschnitt 1.4.1) konstant und unterschieden sich nur im Hinblick auf ihre *I*-Werte, wodurch Unterschiede im chromatischen Mittel möglich wurden, chromatische Szenenstatistiken 2. Ordnung jedoch nicht als cue vorhanden waren (Lee & Smithson, 2012). In jeder Bedingungskombination wurden beide Testfarbensets dargeboten, wobei die Darbietungsreihenfolge zufällig war. Somit können anhand der Unterschiedlichkeit der Punkte subjektiver Gleichheit Rückschlüsse über die temporale Informationsintegration gezogen werden. Lee und Smithsons Ergebnisse zeigen, dass die retinotop Trennung der zu integrierenden Informationen eher zu einer getrennten Integration der visuellen Information führt. Dieser Befund kann zunächst mit adaptationalen Mechanismen erklärt werden. Augenbewegungen oder das Hinzufügen eines kohärenten Hintergrunds führen nicht per se zu einer getrennten Integration. Jedoch führt die Hinzunahme dieser beiden cues bei retinotop überlagerten Testfeldpositionen zu einem Vorteil im Hinblick auf die getrennte Integration der temporalen Information. Dies zeigt, dass lokale Adaptation zwar ein wichtiger Prozess ist, aber nicht der einzige, an dieser Stelle wirksame.

Lee und Smithsons (2012) Ergebnisse zeigen die Stärken angenommener lokaler temporaler Integrationsprozesse auf, die man sich beispielsweise als adaptationale Prozesse vorstellen kann, weisen aber auch deutlich auf die Grenzen solcher adaptationaler Prozesse hin. Ihre Kritik an adaptationalen Prozessen ist analog zur Kritik an der Annahme des chromatischen Mittelwerts als einzigem Hinweisreiz zur Beleuchtungsschätzung zu sehen (vgl. Abschnitt 2.3.4). So kritisieren Lee und Smithson, dass ein lokaler adaptationaler Prozess mit einer Vielzahl chromatisch ähnlicher nicht neutraler Oberflächen nicht umgehen könne. Zudem würden verschiedene Beleuchtungssituationen innerhalb einer Szene durch Augenbewegungen integriert werden, oder durch Bewegungen der Objekte einer Szene oder des Beobachters selbst konfundiert werden.

Neben der Frage nach möglichen Hinweisreizen zur temporalen Integration visueller Information spielt die Frage nach dem temporalen Verlauf der visuellen Informationsintegration eine wichtige Rolle. Lee, Dawson und Smithson (2012) untersuchten den zeitlichen Verlauf von Farbkonstanz mit Hilfe einer Variante des bereits erläuterten Untersuchungsparadigmas (vgl. Lee & Smithson, 2012; Smithson & Zaidi, 2004). Erfasst wurde der momentane Zustand des visuellen Systems mit Hilfe einer Klassifikationsaufgabe, wobei in jedem Durchgang ein Subset von 10 Testfarben für jeweils 2100 ms pro Testfarbe unter einer Beleuchtungsbedingung präsentiert wurde und die

Versuchsperson die Aufgabe hatte, jede dieser Testfarben einer Kategorie zuzuordnen. Danach wurde ein zweites Testfarbenset unter einer zweiten Beleuchtungsbedingung gezeigt. Der Wechsel zwischen beiden Testfarbensets indiziert den Beleuchtungswechsel und durch die nah beieinander liegenden Messungen kann die Verschiebung des Graupunktes und damit der Zustand des visuellen Systems nachvollzogen werden. Im Experiment wird also zwischen zwei Beleuchtungsbedingungen oszilliert und durch die eng beieinander liegenden Messungen der Testfarben kann der Verlauf des Graupunktes nachvollzogen werden, der wiederum zur Bestimmung des zeitlichen Verlaufs der erreichten Farbkonstanz genutzt wird. Dieses Paradigma verwenden Lee et al., um drei Hintergrundbedingungen zu vergleichen. So werden die Testfarbensets in einer Bedingung jeweils von einem Seurathintergrund unter der gleichen Beleuchtung umgeben, in einer weiteren Bedingung wird ein schwarzer Hintergrund dargeboten und in der dritten Bedingung wird für beide Beleuchtungsbedingungen des Testfarbensets ein Seurathintergrund unter einer zwischen beiden Beleuchtungsbedingungen der Testfarben liegenden Beleuchtung dargeboten. Die Daten zeigen, dass sich der Graupunkt über die Zeit hinweg verschiebt. Farbkonstanzleistungen sind in allen drei Bedingungen vorhanden. In der Bedingung, in der durch das passende Umfeld nützliche räumliche und zeitliche Informationen zur Integration zur Verfügung stehen sind die Farbkonstanzleistungen zudem besser als in den anderen beiden Bedingungen. Betrachtet man die Lokalisation der Graupunkte in den zwei Beleuchtungsbedingungen und deren Unterschiedlichkeit zum Ende des Integrationsprozesses in der Bedingung in der die Testfarben vor einem dunklen Hintergrund gezeigt wurden, so spricht dies für einen gleitenden Mittelwert zur Beschreibung der Integration. Lee et al. betonen, dass diese Ergebnisse sehr gut zu Helsons (1943, 1947) Vorschlag zum Erreichen von Farbkonstanz durch den Vergleich mit einem internen Referenzstandard, beispielsweise einem gewichteten geometrischen Mittel, passen. Deutlich unterschiedliche Zustände des visuellen Systems nach einem Beleuchtungswechsel sind nach fünf bis sieben Testfarben erreicht, bzw. nach 10500 ms bis 14700 ms, wie Lee et al. anhand von Simulationsdaten feststellten. Da die Anzeigedauer der Testfarben nicht variiert wurde, ist jedoch nicht klar, ob dieser Effekt auf die Anzahl der Testfarben oder die Präsentationszeit zurückgeht.

Betrachtet man die bisher präsentierten Befunde zur temporalen Informationsintegration, so weisen diese deutlich darauf hin, dass eine temporale Informationsintegration stattfindet. Smithson und Zaidi (2004), Schultz, Doerschner und Maloney (2006) sowie Lee, Dawson und Smithson (2012) verwendeten Testfarben, welche unter natürlichen Beleuchtungen simuliert wurden. In den mit natürlichen Beleuchtungen simulierten Beleuchtungswechseln sind somit die Einflüsse verschiedener Szenenstatistiken vorhanden. Lee und Smithson verwendeten Testfarben, die sich nur im Hinblick

auf den chromatischen Mittelwert unterschieden, jedoch in ein komplexes Paradigma eingebettet waren, wodurch verschiedene cues zur Beleuchtungsschätzung vorhanden waren. Die Arbeiten weisen darauf hin, dass im Stimulus enthaltene chromatische Szenenstatistiken eine Rolle bei der temporalen Informationsintegration zur Beleuchtungsschätzung spielen könnten, eine explizite Untersuchung der Rolle verschiedener chromatischer Szenenstatistiken liegt jedoch nicht vor. Daher stellt sich die Frage, welche Rolle chromatische Szenenstatistiken bei der zeitlichen Integration visueller Information zur Etablierung einer Beleuchtungsschätzung spielen (*Fragestellung I*, Abschnitt 2.5.1 und Kapitel 3). Lee und Smithsons (2012) Arbeit deutet auf einen Einfluss des chromatischen Mittelwerts (vgl. Abschnitt 2.3.1.2) hin, dennoch soll dessen Rolle noch einmal explizit untersucht werden, ebenso wie die im räumlichen Kontext von Golz und MacLeod (2002) als besonders informativ hervorgehobene Rolle der Korrelation zwischen Luminanz und Rötlichkeit, einer Vertreterin der Szenenstatistiken zweiter Ordnung (vgl. Abschnitt 2.3.2.2).

Die Daten von Lee et al. (2012) über den zeitlichen Verlauf von Farbkonstanz lassen sich durch Untersuchungen aus dem Bereich der Helligkeitskonstanz ergänzen. Ein Beispiel aus der Untersuchung der Helligkeitskonstanz ist Gelbs (1929) Experiment, das mit sehr stark reduzierten Stimuli arbeitet. Der Versuchsaufbau bestand aus einem halbdunklen Raum, in dem sich als einzige beleuchtete Oberfläche eine rotierende Scheibe von geringer Reflektanz befand. Wurde ausschließlich diese Oberfläche von einer Lichtquelle bestrahlt, wurde sie von den Versuchspersonen als weiß oder gräulich-weiß und in die sie umgebende Beleuchtungssituation eingebettet empfunden. Hielt Gelb jedoch eine kleine helle Oberfläche vor die Scheibe, wurde die zunächst als weiß empfundene Scheibe als schwarz empfunden. Dieses Umschlagen der Farbe der Scheibe geschieht plötzlich, nicht allmählich. Ebenso verhält es sich, wenn die kleine helle Oberfläche wieder entfernt wird. Dann nimmt die Scheibe schnell wieder ein dunkles Aussehen an. Annan und Gilchrist (2004) ergänzen hierbei, dass bei mehrfach wiederholtem Hinzufügen und Entfernen die Scheibe zwar jedes Mal hell wird, jedoch bei den folgenden Präsentationen einen geringeren Helligkeitsgrad aufweist, als bei der ersten isolierten Präsentation. Gelb (1929) berichtet ebenfalls ein Variante dieses Experiments. Wenn der Spot, der nur auf die Scheibe gerichtet ist, langsam vergrößert wird, sodass er auch das Umfeld des Raumes erfasst, geht der weiße Farbeindruck der Scheibe allmählich in den einer intensiv beleuchteten grauen oder schwarzen Scheibe über (Gelb, 1929).

Annan und Gilchrist (2004) untersuchten in einer Serie von Experimenten systematisch die Auswirkung eines sich verändernden Umfelds auf die wahrgenommene Helligkeit einer Oberfläche. Hierbei wurde die wahrgenommene Helligkeit eines Testfel-

des in einer mit einem achromatischen Mondrianstimulus ausgekleideten Stimuluskiste von den Versuchspersonen eingeschätzt. Zentrales Element dieser Box war eine verschiebbare Rückwand, wodurch die Zusammensetzung der auf der Rückwand sichtbaren achromatischen Farbfelder verändert werden konnte. Zunächst waren alle Seiten der Kiste inklusive der Rückwand mit schwarzen bis dunklen Farbfeldern ausgekleidet. Das Testfeld war ein Feld von geringer Reflektanz, hatte jedoch von allen in der Kiste befindlichen Feldern die höchste Luminanz. Die Versuchspersonen beschrieben dieses Feld als weiß und wählten einen Munsellchip, der den Farbeindruck der Oberfläche repräsentierte. Im nächsten Schritt wurde die Beobachtungssituation verändert, indem die Rückwand verschoben wurde, sodass einige hellgraue und weiße Felder hinzukamen. Die Versuchspersonen hatten für eine bestimmte Zeitspanne die Möglichkeit, sich die Oberflächen der Kiste anzuschauen und sollten dann erneut eine Einschätzung der Helligkeit des zweiten Testfeldes abgeben. Beide Testfelder entsprachen sich in Bezug auf ihre Reflektanz, die Helligkeit des zweiten Testfeldes wurde jedoch von den Versuchspersonen dunkler beschrieben. Mit zunehmender Verweildauer zwischen den beiden Urteilen wurde die Farbe des zweiten Testfeldes als dunkler beschrieben. Im Vergleich zu einer Baseline, für die eine Kontrollgruppe ausschließlich die zweite Beobachtungssituation beurteilte, war die wahrgenommene Testfeldhelligkeit höher, wenn beide Beleuchtungssituationen bearbeitet wurden. Diesen Effekt, dass die wahrgenommene Helligkeit des Testfeldes in der ersten Beobachtungssituation eine Wirkung auf die wahrgenommene Testfeldhelligkeit in der zweiten Beobachtungssituation hat, bezeichnen Annan und Gilchrist als *Lightness Hangover Illusion*. Die Stärke der Lightness Hangover Illusion nimmt mit zunehmender Verweildauer in der zweiten Beobachtungssituation ab, jedoch liegt die wahrgenommene Helligkeit des Testfeldes auch nach 160 s Verweildauer in der zweiten Beobachtungssituation deskriptiv noch deutlich über der wahrgenommenen Testfeldhelligkeit in der Kontrollbedingung. Annan und Gilchrist führten eine Variation der Experimentalbedingung ein. So wurde während des Wechsels zwischen erster und zweiter Beobachtungsbedingung die Beleuchtung der Kiste für 2 – 3 s gelöscht. Dies führte zu einem vollständigen Verschwinden der Lightness Hangover Illusion. Einen etwas schwächeren aber ähnlichen Effekt erzielten Annan und Gilchrist, wenn sie die Versuchspersonen baten, zwischen beiden Beobachtungssituationen den Kopf aus der Kiste zu nehmen und sich im Experimentalraum umzuschauen.

Annan und Gilchrist (2004) sehen in den in beiden Beobachtungssituationen gleich bleibenden Feldern den zentralen Hinweisreiz darauf, dass sich die Beleuchtung nicht verändert hat. Gleichzeitig ändert sich jedoch in der zweiten Beobachtungssituation die höchste Luminanz. Die Integration dieser beiden konfligierenden Informationen machen die Autoren für das Entstehen der Lightness Hangover Illusion verantwort-

lich. Annan und Gilchrist gehen davon aus, dass ein durchgehendes passives Monitoring der Oberflächen im Blickfeld stattfindet. Ändert sich die Luminanz dieser Oberflächen nicht, spräche dies gegen eine Beleuchtungsveränderung, womit jede Oberfläche einen Beitrag zur Bestimmung der Beleuchtungsinformation leistet. Unter passivem Monitoring verstehen Annan und Gilchrist, dass es zwar nicht notwendig ist, die Oberflächen aktiv und aufmerksam zu beobachten, jedoch müssen sie im Blickfeld bleiben, um Luminanzveränderungen detektieren zu können.

Bei der Untersuchung der temporalen Integration visueller Information mit dem Ziel, ein farbkonstantes Perzept zu erreichen, steht neben der Frage, welche Hinweisreize das visuelle System zur Beleuchtungsschätzung nutzt, die Frage nach den Eigenschaften des Integrationsmechanismus im Vordergrund (Abschnitt 2.4). Die Arbeit von Lee et al. (2012) beschäftigt sich mit der Größe des Zeitfensters über das die Informationen integriert werden. Die daran anknüpfende Frage, ob das Zeitfenster über das die Informationen integriert werden, ein festes Zeitintervall ist oder ob das visuelle System flexibel auf Hinweisreize auf gravierende Veränderungen des visuellen Inputs reagieren kann, steht im Zentrum der *Forschungsfrage II* (Abschnitt 2.5.2 und Kapitel 4). Die Arbeit von Annan und Gilchrist (2004) zur *Lightness Hangover Illusion* deutet für Fragestellungen der Helligkeitskonstanz darauf hin, dass das visuelle System zu einer flexiblen Reaktion in der Lage ist.

2.5 Hypothesen

Die vorliegende Arbeit untersucht drei Fragestellungen. Im Zentrum dieser Fragestellungen steht die Frage, welche Informationen das visuelle System verwendet, um ein farbkonstantes Perzept zu erlangen. Dabei konzentrieren sich die *Forschungsfragen I & II* auf Aspekte der temporalen Informationsintegration und untersuchen diese im Hinblick auf die Funktion chromatischer Szenenstatistiken als Hinweisreize für eine Beleuchtungsschätzung. Dabei werden zum einen Hinweisreize, welche zur Beleuchtungsschätzung verwendet werden könnten, untersucht, zum anderen werden Hinweisreize untersucht, die auf eine Beleuchtungsänderung hindeuten. *Forschungsfrage III* untersucht Hinweisreize zur Beleuchtungsschätzung in einem komplexen Paradigma, in welchem der Beobachter am Beispiel räumlicher Seuratszenen, natürliche und nicht natürliche Beleuchtungswechsel direkt beobachten konnte. Dabei stehen direkte Urteile über die Beleuchtungswechsel in Abhängigkeit von deren Eigenschaften im Zentrum des Interesses.

2.5.1 Forschungsfrage I – Die Rolle chromatischer Szenenstatistiken bei der temporalen Informationsintegration

Aus der in Abschnitt 2.4.2 hergeleiteten Notwendigkeit, die Rolle chromatischer Szenenstatistiken bei der zeitlichen Integration visueller Informationen zu untersuchen,

lassen sich in Verbindung mit den bisherigen Befunden zur Rolle chromatischer Szenenstatistiken 1. und 2. Ordnung zwei spezifische Hypothesen ableiten. So sollen exemplarisch die beiden chromatischen Szenenstatistiken, die im Kontext der räumlichen Integration visueller Information zur Beleuchtungsschätzung intensiv untersucht und als vielversprechend identifiziert wurden, herausgegriffen werden und näher untersucht werden. Da sowohl der chromatische Mittelwert als auch die Korrelation zwischen Luminanz und Rötlichkeit der empirischen Prüfung standhielten und sich im räumlichen Informationsintegrationskontext als nützlicher cue zur Beleuchtungsschätzung erwiesen, wird erwartet, dass das visuelle System auch bei der temporalen Integration visueller Information zur Beleuchtungsschätzung und damit zum Etablieren eines farbkonstanten Perzepts auf diese cues zurückgreift. Die Rolle beider Hinweisreize wurde in getrennten Experimenten untersucht. Die Experimente arbeiteten jedoch mit dem gleichen Untersuchungsparadigma. Dabei wurden den Versuchspersonen vor dunklem Hintergrund nacheinander Farben gezeigt. Die Eigenschaften dieses Sets von Stimulusfarben können mit Hilfe chromatischer Szenenstatistiken beschrieben werden. Zwischen den Bedingungen wurde die Ausprägung einer chromatischen Szenenstatistik variiert, während die anderen kontrolliert wurden. Gemessen wurde die Farbkategoriengrenze zwischen zwei Komplementärfarben als Operationalisierung eines Neutralpunktes. Hierzu wurde direkt im Anschluss an die Präsentation des Stimulusfarbensets eine Testfarbe präsentiert, welche klassifiziert werden sollte.

Zur Prüfung der Hypothese, dass der chromatische Mittelwert auch bei der temporalen Integration visueller Information vom Wahrnehmungssystem als Hinweisreiz verwendet wird, wird folgende spezifische Hypothese formuliert:

Hypothese I: Im Rahmen des Beleuchtungsschätzungsansatzes wird erwartet, dass ein Teil der mittleren Chromatizität der visuellen Information der Beleuchtung zugeordnet wird und sich somit der als neutral wahrgenommene Punkt in Abhängigkeit der mittleren Chromatizität verändert.

Zur Prüfung der Hypothese, dass die Korrelation zwischen Luminanz und Rötlichkeit in Verbindung mit einem spezifischen chromatischen Mittelwert auch bei der temporalen Integration visueller Information vom Wahrnehmungssystem als Hinweisreiz zur Etablierung eines farbkonstanten Perzepts verwendet wird, wird folgenden spezifische Hypothese abgeleitet:

Hypothese II: Bei gegebenem chromatischem Mittelwert einer visuellen Information verändert sich der wahrgenommene neutrale Punkt in Abhängig-

keit von der in der visuellen Information enthaltenen Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation. Es wird von einer monotonen Beziehung zwischen Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation und der Chromatizität des als neutral wahrgenommenen Punktes ausgegangen.

Die empirische Prüfung der *Hypothesen I* und *II* wird in Kapitel 3 vorgestellt. *Experiment I* prüft *Hypothese I* (vgl. Abschnitt 3.2), *Experiment II* (vgl. Abschnitt 3.3) und *Experiment III* (vgl. Abschnitt 3.4) befassen sich mit der Untersuchung der zweiten Hypothese.

2.5.2 Forschungsfrage II – Flexible Reagibilität des visuellen Systems auf grundlegende Veränderungen der visuellen Informationen

Die Auflösung der *Lightness Hangover Illusion* durch eine Dunkelphase oder eine Kopfbewegung (Annan & Gilchrist, 2004) und die damit verbundene Etablierung einer neuen Helligkeitsbeurteilung stellt die Frage (*Fragestellung II*) in den Raum, ob das visuelle System fähig ist, auf Hinweisreize, die auf eine Veränderung der Beleuchtung hindeuten auch bei der temporalen Integration flexibel zu reagieren und die Beleuchtungsschätzung anzupassen (*Reset*). Letztendlich gibt es zwei Situationen, in denen eine schnelle Anpassung der Beleuchtungsschätzung sinnvoll wäre. Zum einen, wenn sich die Beleuchtung stark verändert, zum anderen wenn sich die Beobachtungsbedingungen stark verändern, weil der Beobachter seine Blickrichtung verändert oder beispielsweise einen anderen Raum betritt. Diese Frage soll am Beispiel zweier Hinweisreize auf eine Beleuchtungsänderung in Kapitel 4 untersucht werden. Hierzu werden zunächst zwei mögliche Hinweisreize ausgewählt: Ein monitoring-inhärenter und ein monitoring-unterbrechender Hinweisreiz. Monitoring-inhärente Hinweisreize umfassen alle Hinweisreize die in der Umwelt liegen und direkt aus dem visuellen Input extrahiert werden können. Dementsprechend sind diese Hinweisreize ein Ergebnis externaler Veränderungen, die durch kontinuierliches Monitoring entdeckt werden können. Hierzu zählen Veränderungen der Beleuchtung, die durch Veränderungen der Umweltsituation verursacht werden und in einer plötzlich auftretenden großen Chromatizitätsdifferenz des visuellen Inputs münden, beispielsweise die veränderte Beleuchtung durch eine vor die Sonne wandernde Wolke. Monitoring-unterbrechende Hinweisreize umfassen alle Hinweise auf potentielle Inputveränderungen auf Grund der Handlungen einer Person, beispielsweise starke Kopfbewegungen oder ein längeres Schließen der Augen. Diese Hinweisreize entstehen also durch eine Unterbrechung des Umweltmonitorings.

Experiment IV untersucht, ob monitoring-unterbrechende Hinweisreize vom visuellen System genutzt werden, um einen Reset der Beleuchtungsschätzung vorzunehmen, sodass eine neue Beleuchtungsschätzung etabliert wird. *Experiment V* unter-

sucht dies für monitoring-inhärente Hinweisreize. Wird eine Beleuchtungsveränderung ohne Hinweisreize für einen Reset dargeboten, sollte der temporale Integrationsprozess die visuelle Information über den Beleuchtungswechsel hinaus integrieren. Sind jedoch Hinweisreize vorhanden ist zu erwarten, dass das visuelle System eine neue Beleuchtungsschätzung vornimmt, indem es die zeitliche Integration der visuellen Information anpasst (*Reset*). Der als farblich neutral wahrgenommene Punkt ist abhängig von der geschätzten Beleuchtung, weshalb er als geeignetes Maß erscheint und durch die Messung einer Farbkategoriengrenze operationalisiert wird. Hinweisreize, die das visuelle System zum Anlass nimmt, um eine Anpassung der temporalen Informationsintegration vorzunehmen und damit eine neue Beleuchtungsschätzung zu etablieren, werden verkürzt als *Resetauslöser* bezeichnet.

Hypothese III: Vergleicht man die Messung einer Grenze zwischen zwei Farbkategorien kurz nach einem Beleuchtungswechsel, wenn kein oder wenn ein *Resetauslöser* präsentiert wurde, so sollte die Farbkategoriengrenze stärker von der neuen Beleuchtung beeinflusst sein, wenn ein *Resetauslöser* präsentiert wurde.

2.5.3 Forschungsfrage III – Chromatische Regularitäten bei der Beurteilung von Beleuchtungswechseln mit natürlichen Stimuli

Foster und Nascimento (1994) zeigten, dass das Verhältnis der Zapfenerregungen zweier Oberflächen über einen Beleuchtungswechsel hinweg weitestgehend invariant bleibt. Darüber hinaus zeigten sie, dass Versuchspersonen solche simulierten Beleuchtungswechsel als natürliche Beleuchtungswechsel bevorzugten, deren Zapfenerregungsverhältnisse exakt invariant blieben (*exakt normalisationskompatible Beleuchtungswechsel*) und diese tatsächlich natürlich simulierten Beleuchtungswechseln vorzogen (Nascimento & Foster, 1997). Darüber hinaus zeigten sie, dass der Grad der Bevorzugung von Beleuchtungswechseln mit invarianten Zapfenerregungsverhältnissen umso höher war, je stärker sich natürliche Beleuchtungswechsel von exakt normalisationskompatiblen unterschieden. Den Grund für diese Bevorzugung von Beleuchtungswechseln mit exakt invarianten Zapfenerregungsverhältnissen vor natürlichen Beleuchtungswechseln sehen Nascimento und Foster darin, dass die Invarianz der Zapfenerregungsverhältnisse der Hinweisreiz ist, der zur Generierung eines farbkonstanten Perzepts herangezogen wird, und Abweichungen von dieser Invarianz als unsystematisch und zufällig einzustufen sind. *Hypothese IV* beschreibt die Replikation dieses Ausgangsbefundes. Betrachtet man die Arbeit von Golz und MacLeod (Golz, 2005, 2008; Golz & MacLeod, 2002) wird klar, dass die durch die exakte Normalisationskompatibilität nicht beschriebenen Veränderungen bei einem Beleuchtungswechsel keinesfalls komplett unsystematisch sind. Vielmehr sind in diesem Anteil systema-

tische Teile enthalten, so zum Beispiel chromatizitätsabhängige Luminanzverschiebungen (*Chromatizitäts-Intensitäts-Änderungen*). Da die empirischen Prüfungen zeigen, dass das visuelle System auf diesen Hinweisreiz zurückgreift, ist der Informationsgehalt von Beleuchtungswechseln, die beide Hinweisreize enthalten, höher als der von Beleuchtungswechseln, die nur einen Hinweisreiz enthalten und sollten somit diesen vorgezogen werden (*vgl. Hypothese V*).

Hypothese IV: Aus diesen beiden Befundlagen ergibt sich analog zu Nascimento und Foster (1997) die Erwartung, dass gegenüber natürlichen Beleuchtungswechseln, Beleuchtungswechsel bevorzugt werden, die exakt normalisationskompatibel sind. Diese Bevorzugung ist umso stärker, je größer der Unterschied zwischen der exakt normalisationskompatiblen und der natürlichen Beleuchtungsveränderungskomponente ist.

Hypothese V: Unter Einbezug der Befunde von Golz und MacLeod (Golz, 2005, 2008; Golz & MacLeod, 2002) lässt sich die von Nascimento und Foster (1997) getroffene Erwartung präzisieren und dahingehend erweitern, dass gegenüber Beleuchtungswechseln die exakt normalisationskompatibel sind, Beleuchtungswechsel bevorzugt werden, die exakt normalisationskompatibel sind und eine Chromatizitäts-Intensitäts-Änderung aufweisen. Diese Bevorzugung ist umso stärker, je größer der Unterschied zwischen den beiden Beleuchtungswerseltypen ist.

Kapitel 5 beschreibt die Untersuchung der *Hypothesen IV* und *V* in den *Experimenten VI, VII* und *VIII*.

II Esperimente

3. Forschungsfrage I – Die Rolle chromatischer Szenenstatistiken bei der temporalen Informationsintegration

In den folgenden drei Experimenten wird die Idee, dass das visuelle System chromatische Regularitäten der visuellen Szene, welche es dem visuellen System erlauben, Schlussfolgerungen über die Beleuchtung zu ziehen, nutzt, vom räumlichen Informationsintegrationsansatz auf eine temporale Informationsintegrationsidee projiziert. Zwei zentrale Regularitäten werden intensiv untersucht, der in seiner Funktion bereits gut untersuchte chromatische Mittelwert und die Korrelation zwischen Luminanz und Rötlichkeit (*LRK*) (*Forschungsfrage I*, vgl. Abschnitt 2.5.1). In *Experiment I* wird die Rolle des chromatischen Mittelwerts untersucht, wobei im Rahmen des Beleuchtungsschätzungsansatzes erwartet wird, dass ein Teil der mittleren Chromatizität der visuellen Information der Beleuchtung zugeordnet wird und sich somit der als neutral wahrgenommene Punkt in Richtung der mittleren Chromatizität verschiebt (vgl. *Hypothese I*). Die *Experimente II* und *III* untersuchen die Rolle der chromatischen Regularität, die durch die Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation beschrieben werden kann und vom visuellen System zur Etablierung einer Beleuchtungsschätzung bei der temporalen Informationsintegration verwendet werden kann. In diesem Rahmen wird erwartet, dass bei gegebenem chromatischem Mittelwert einer visuellen Information sich der wahrgenommene neutrale Punkt in Abhängigkeit von der in der visuellen Information enthaltenen Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation verändert (vgl. *Hypothese II*). Es wird hierbei von einer monotonen Beziehung zwischen *LRK* und der Chromatizität des als neutral wahrgenommenen Punktes ausgegangen, wobei erwartet wird, dass höhere *LRK* mit höheren *I*-Werten des als neutral wahrgenommenen Punktes einhergehen. Da allen drei Experimenten das gleiche Untersuchungsparadigma zu Grunde liegt, wird dieses vorab vorgestellt.

3.1 Allgemeine Methoden

Zur Untersuchung der Frage, welche chromatischen Regularitäten bei der temporalen Integration visueller Information im Zuge einer Beleuchtungsschätzung vom visuellen System berücksichtigt werden, wurde ein zeitlich sukzessiv präsentierter Stimulusreiz mit einer Klassifikationsaufgabe verbunden. Eine Reihe zeitlich direkt hintereinander präsentierter Farben, das sogenannte Stimulusfarbense, wird von einer direkt an diese Präsentation angeschlossenen Messung mit Hilfe einer adaptiv ausgewählten Testfarbe gefolgt (vgl. Abbildung 3.1). Solch ein Zyklus wird so oft direkt hintereinander durchlaufen, bis das Ziel erreicht ist, auf Basis der Klassifikationen der Testfarbe, zu einer Schätzung eines Punktes auf der Grenze zwischen zwei Farbkate-

gorien zu gelangen. Die Versuchsperson hat dabei Aufgabe, die Testfarbe als zu einer von zwei opponierenden Farbkategorien („rot versus grün“ oder in anderen Durchgängen „blau versus gelb“) zugehörig zu klassifizieren. Zur Erhöhung der Verlässlichkeit der Messergebnisse wird in allen Experimenten ein wiederholtes komplettes Messwiederholungsdesign verwendet, sodass jeder Teilnehmer sämtliche Bedingungen mehrmals bearbeitet. Zur Beschreibung der Chromatizitäten findet der MacLeod-Boynton-Farbraum (MLB, MacLeod & Boynton, (1979)) Anwendung, der durch die Chromatizitätsvariablen l und s sowie die *Luminanz* aufgespannt wird (vgl. Abschnitt 1.4.1).

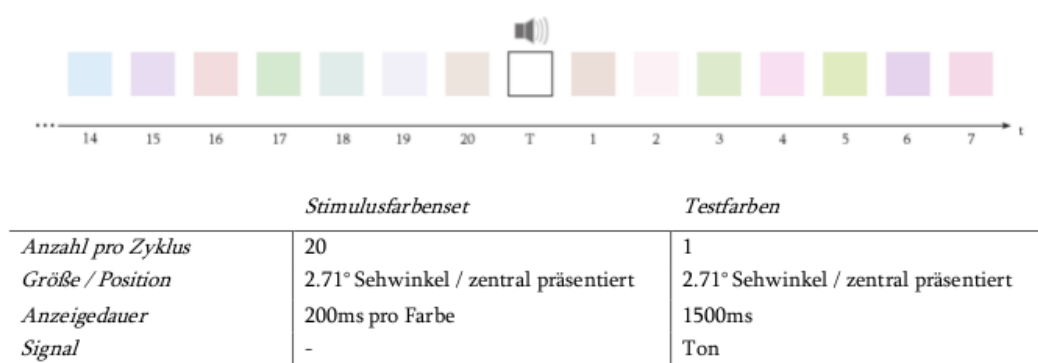


Abbildung 3.1: Schematische Ablaufskizze, mit beispielhafter Aneinanderreihung zweier Zyklen. Zusätzlich sind die zentralen Angaben zur Präsentation des Stimulusfarbensets und der Testfarben zusammengefasst.

Stimulusfarbenseit (DCS). Zur Untersuchung der Rolle der chromatischen Regularitäten werden ausgewählte chromatische Eigenschaften des Stimulusfarbenseits in Abhängigkeit von der experimentellen Bedingung variiert. Dem Stimulusfarbenseit kommt in seiner Rolle als temporalem proximalem Reiz die Aufgabe zu, im visuellen System die Annahme einer bestimmten Beleuchtungsausprägung zu initiieren. Zu den im Experiment kontrollierten Eigenschaften eines Stimulusfarbenseits gehören der chromatische Mittelwert des Sets (M_l , M_s , $M_{Luminanz}$), die dazugehörigen Standardabweichungen (SD_l , SD_s , $SD_{Luminanz}$) sowie die Korrelationen zwischen den verschiedenen Ebenen ($r(l, Luminanz)$, $r(s, Luminanz)$, $r(l, s)$), wobei der chromatische Mittelwert und die Korrelationen zwischen der l -Chromatizität und der *Luminanz* entsprechend der Fragestellung zur gezielten experimentellen Manipulation herangezogen wurden. Mittels einer auf Zufallszahlen basierenden mathematischen Prozedur wurden für jede untersuchte Bedingung Stimulusfarbenseits erstellt, wobei bei der Auswahl geeigneter Sets darauf geachtet wurde, dass sich die Farbwerte auf den l - und s -Achsen möglichst normalverteilen und sich weder große Ausreißer noch unbesetzte Bereiche in im (l, s) -Chromatizitätsdiagramm des MacLeod-Boynton Farbraumes zeigen.

Adaptive Messung. Der neutrale Punkt wird durch die Messung eines Punktes auf der Grenze zwischen zwei Farbkategorien operationalisiert und ist somit im Hinblick auf diese beiden Farbkategorien neutral. Dazu wird eine adaptive Doppel-Staircase-Prozedur gewählt, da diese eine situations- und versuchspersonenspezifische Auswahl der Testfarbe auf Basis der vorangehenden Antworten der Versuchsperson erlaubt. Jede der beiden Treppen ist eine eigenständige adaptive Prozedur, welche die nächste Testfarbe auf Basis der Reaktion der Versuchsperson auf die letzte Testfarbe innerhalb dieser Treppe festlegt. Da die Aufgabe innerhalb eines Durchgangs dieselbe bleibt, ist zu erwarten, dass die beiden Treppen im Verlauf konvergieren. Die Startpunkte jeder Treppe bilden die Endpunkte einer Teststrecke, entlang der die Testfarben ausgewählt werden. Hierbei wird darauf geachtet, dass nur unterschiedlich darstellbare Farben (RGB-Werte) als Testfarben ausgewählt werden können. Die Teststrecke wird in den drei Experimenten parallel zu einer Achse in das MLB-Chromatizitätsdiagramm gelegt, wobei die andere Dimension konstant gehalten wird. Alle präsentierten Testfarben werden in Abhängigkeit von Schrittgröße und Schrittrichtung ausgewählt.

Die *Schrittgröße* kodiert die Distanz zwischen der letzten präsentierten Testfarbe und der als nächste auszuwählenden innerhalb einer Treppe. Die Schrittgröße wird beibehalten, solange die Versuchsperson ihre Antwortrichtung beibehält, sprich die Testfarbe derselben Farbkategorie zuordnet. Die *Schrittrichtung* bezeichnet die Richtung entlang der Teststrecke, in der die nächste Testfarbe ausgewählt wird. Sobald die Versuchsperson ihr Verhalten ändert, indem sie die Testfarbe der anderen Farbkategorie zuordnet, wird für die Auswahl des nächsten Testfeldes die Richtung umgekehrt und die Schrittgröße halbiert. Diese Halbierung findet bei jeder Richtungsänderung statt, bis die minimale Schrittgröße von eins erreicht ist oder das Abbruchkriterium erfüllt wurde. Welche Treppe zu einem gegebenen Zeitpunkt aktiv und damit für das ausgewählte und präsentierte Testfeld verantwortlich ist, wird zufällig gewählt.

Als *Abbruchkriterium* eines Durchgangs wird ein Abbruchintervall festgelegt, das durch eine bestimmte Anzahl von Klassifikationen innerhalb einer bestimmten Spannweite von nebeneinanderliegenden Testfarben definiert wird. Für das Erfüllen des Abbruchkriteriums ist es unwichtig, von welcher Treppe ein zu klassifizierendes Testfeld ausgewählt wurde. Als Folge der Kategorisierungsaufgabe befindet sich das Abbruchintervall in dem Bereich, in dem die Testfarben um die Grenze zwischen zwei Farbkategorien streuen, beziehungsweise in der Region, in der die Versuchsperson nicht in der Lage ist die Testfarben konstant einer Kategorie zuzuordnen. Beide möglichen Beschreibungen implizieren, dass der beste mögliche Schätzer für die Farbkategoriengrenze der Mittelwert der Testfarbenwerte innerhalb des Abbruchintervalls ist. Ein solcher Mittelwert wird im Folgenden als Rohdatenpunkt bezeichnet.

Ein zweites Abbruchkriterium wird für den Fall eingesetzt, dass das erste Abbruchkriterium nicht erreicht wird, da die Antworten der Versuchsperson breiter oszillieren und nicht das erwartete Konvergenzlevel erreichen. Dies könnte beispielsweise bei Versuchspersonen mit einem großen indifferenten Bereich der Fall sein. Dieses zweite Kriterium ist erreicht wenn die doppelte Anzahl an aufeinanderfolgenden Messungen innerhalb der doppelten Spannweite des ersten Abbruchkriteriums liegen.

Versuchsaufbau. Alle Daten wurden in einem abgedunkelten Raum mit sorgfältig kalibrierten LCD-Monitor (Eizo ColorEdge CG243W, mit 8 Bit / Kanal) erhoben. Kalibrierung und Umrechnung zu LMS Zapfenerregungswerten (Andrew Stockman, MacLeod, & Johnson, 1993) wurden anhand von Standardempfehlungen (Brainard, 1989; Golz & MacLeod, 2003) mit einem Kolorimeter (LMS 1290) durchgeführt. Der Monitor war in einen mit schwarzem Moosgummi ausgekleideten Reflektanztunnel eingebettet, sodass der Beobachter in einer Entfernung von 57 cm zum Monitor saß. Die Stimulusfarben und Testfarben wurden als Quadrate (Kantenlänge 27 mm, 2.71° Sehwinkel) an derselben Position in der Mitte des Monitors und von einem schwarzen Hintergrund umgeben dargeboten. Die Stimulusfarben wurden direkt aneinander anschließend für jeweils 200 ms dargeboten, wobei die Präsentationsreihenfolge des Stimulusfarbensets innerhalb eines Durchgangs konstant blieb (Abbildung 3.1). Nach jeder Präsentation des gesamten Stimulusfarbensets wurde in direktem Anschluss eine Testfarbe für 1500 ms dargeboten, deren Erscheinen durch ein akustisches Signal gekennzeichnet wurde. Darstellungszeiten für Stimulusfarben und Testfarben basieren auf der Arbeit von Smithson und Zaidi (2004). Während die Testfarbe angezeigt wurde, konnten die Versuchspersonen ihre Klassifikation durch Drücken einer von zwei Antworttasten eingeben. Die erste gegebene Antwort wurde gewertet und innerhalb der Staircase-Prozedur weiterverwendet. Falls keine Antwort innerhalb des Antwortzeitfensters gegeben wurde, wurde die Testfarbe am Ende des nächsten Zyklus erneut präsentiert. Der Durchgang endete mit dem Erfüllen eines der beiden Abbruchkriterien des Staircases.

Versuchsablauf. Vor der Datenerhebung konnte sich die Versuchsperson für fünf Minuten an die Dunkelheit im Experimentalraum gewöhnen und wurde dann sorgfältig anhand standardisierter Instruktionen instruiert. Ein repräsentatives Beispiel findet sich in Anhang A.1. Vor der Datenerhebung bearbeiteten die Versuchspersonen Übungsdurchgänge, die ihnen die Möglichkeit *gaben*, sich mit der Aufgabe vertraut zu machen und offene Fragen zu klären. Zum Abschluss der gesamten Datenerhebung wurde ein kurzes strukturiertes Interview geführt, in welchem demographische Informationen und Erfahrungen während der Bearbeitung erhoben wurden.

3.2 Experiment I. Untersuchung des Mittelwertes als chromatische Szenenstatistik bei der temporalen Integration visueller Information

Dieses Experiment rückt den chromatischen Mittelwert in den Fokus. Allgemein formuliert, wird ausgehend von den oben dargestellten Informationen angenommen, dass der Mittelwert eines vorab sequentiell präsentierten Stimulusfarbensets den Farbeindruck einer Testfarbe dahingehend beeinflusst, dass sich der wahrgenommene Farbeindruck in Richtung des Mittelwerts des Stimulusfarbensets verschiebt und in Konsequenz zu einer analogen Verschiebung der Farbkategoriengrenze in dieselbe Richtung führt. Als Grund hierfür wird eine Attribution eines Teils der Chromatizität des Testfeldes auf die aus dem temporalen proximalen Reiz geschätzte Beleuchtung angenommen. Mit zunehmender Rötlichkeit der Stimulusfarbensets wird also erwartet, dass es - bei konstanter zeitlicher Integrationsdauer und -menge - zu einer Verschiebung der Farbkategoriengrenze in Richtung der mittleren Rötlichkeit des Stimulusfarbensets kommt. Das analoge Rational gilt für die Farbkategoriengrenze zwischen Blau und Gelb.

Versuchsdesign. Ausgehend von der zentralen Frage, ob der Mittelwert als eine chromatische Szenenstatistik nicht nur in der räumlichen Integration visueller Farbinformationen eine Rolle spielt, sondern ebenfalls bei der zeitlichen Integration, wurde das folgende Versuchsdesign verwendet. Um die Komplexität des Designs zu reduzieren, wurden die zwei Untersuchungsebenen getrennt, sodass ein Teilexperiment die Abhängigkeit von der mittleren *I*-Chromatizität untersuchte, das andere die Abhängigkeit von der mittleren *s*-Chromatizität. Operationalisiert wurde dies, indem die Grenze zwischen zwei Farbkategorien untersucht wurde.

Einfluss des chromatischen Mittelwerts: mittlere *I*-Chromatizität. Um den Einfluss der mittleren *I*-Chromatizität zu untersuchen wurde der chromatische Mittelwert der Stimulusfarben auf der *I*-Achse zwischen den Bedingungen variiert, während die Verteilungsmittelwerte auf der *s*- sowie der Luminanzachse konstant gehalten wurden (Tabelle 3.1). Drei Experimentalbedingungen wurden gebildet, wobei jede einen anderen Bereich von *I*-Werten beinhaltete. Die erste Bedingung wird durch ein Stimulusfarbenset repräsentiert, mit einem, im Vergleich zu den anderen beiden Bedingungen, moderaten chromatischen Mittelwert ($M_I = 0.6877$, $M_s = 1.1466$, $M_{Luminanz} = 85$). Dieser chromatische Mittelwert beschreibt die Position einer Beleuchtung mit einer Farbtemperatur von 7000 Kelvin und wird im Folgenden als *neutrale* Bedingung bezeichnet. Die zweite Bedingung - im Folgenden als *rote* Bedingung bezeichnet - wird durch ein Stimulusfarbenset mit einer in Relation höheren mittleren *I*-Chromatizität gebildet. Die dritte Bedingung repräsentiert ein Stimulusfarbenset mit einem in Rela-

tion geringen mittleren I -Wert und wird im Folgenden als *grüne* Bedingung bezeichnet. Der I -Wert des Mittelwerts der roten Bedingung ($M_I = 0.712$, $M_s = 1.1466$, $M_{Luminanz} = 85$) entspricht dem I -Wert einer rötlichen Beleuchtung mit einer Farbtemperatur von 4000 Kelvin, der I -Wert der grünen Bedingung ($M_I = 0.67$, $M_s = 1.1466$, $M_{Luminanz} = 85$) entspricht dem I -Wert einer Beleuchtung mit einer Farbtemperatur von 20000 Kelvin, während die s -Werte aus Gründen der Konstanthaltung von der neutralen Bedingung übernommen wurden. Durch diese Wahl der chromatischen Mittelwerte wird eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit denen von Golz (2005) möglich. Die weiteren chromatischen Szenenstatistiken, die ebenfalls in allen Bedingungen gleich sind, sind in Tabelle 3.1 dargestellt und wurden zur erhöhten Vergleichbarkeit aus Golz (2008) adaptiert. Die mittlere Luminanz aller Stimulusfarbensets wurde auf 85 gesetzt, da diese Ebene einen großen Gamut des Monitors bot. Für alle drei Bedingungen wurde ein Stimulusfarbenset, das auf den gleichen Zufallswerten basierte, verwendet und zur Herstellung der jeweiligen experimentellen Bedingung entlang der I -Achse verschoben, sodass sich die verschiedenen Mittelwerte einstellten. Hierdurch wiesen alle Stimulusfarbensets abgesehen von den gezielt manipulierten chromatischen Mittelwerten gleiche Verteilungen und Eigenschaften auf. Die ausgewählten Stimulusfarbensets zeigten in allen drei Bedingungen annähernd normalverteilte I -Werte, wobei alle Werte innerhalb von zwei Standardabweichungen um den Mittelwert lagen. Die Verteilung der s -Werte zeigt eine leichte Schiefe während auf eine möglichst gleichmäßige Abdeckung des Chromatizitätsdiagramms (vgl. Abbildung 3.2) geachtet wurde.

Die Staircases wurden gemäß der in Abschnitt 3.1 gegebenen Beschreibung konstruiert. Zur Messung des Verlaufs der Farbkategoriengrenze zwischen Rot und Grün wurden insgesamt fünf Teststrecken in das MLB-Chromatizitätsdiagramm gelegt, wobei jede Teststrecke parallel zur I -Achse verlief. Die genaue Lage der Teststrecken und die gewählten Endpunkte der Teststrecken orientieren sich an den Kennwerten des Stimulusfarbensets. Die Endpunkte jeder Teststrecke lagen zwei Standardabweichungen des Stimulusfarbensets unterhalb des Mittelwerts des grünen Stimulusfarbensets ($I = 0.66$) sowie zwei Standardabweichungen oberhalb der Mittelwerts des roten Stimulusfarbensets ($I = 0.722$). Die erste Teststrecke wurde so in das MLB-Chromatizitätsdiagramm gelegt, dass sie direkt durch die mittleren s -Chromatizitäten der Stimulusfarbensets lief ($s = 1.1466$). Die Luminanz der Testfarben wurde fixiert ($Luminanz = 85$). Um den Verlauf der Grenzen zwischen Rot und Grün für einen größeren Bereich im Chromatizitätsdiagramm zu untersuchen, wurden vier weitere, zur ersten Strecke parallel verlaufende Teststrecken durch den Farbraum gelegt (Abbildung 3.2). Je eine Strecke wurde eine und zwei Standardabweichungen der

Stimulusfarbensets (Tabelle 3.1) entlang der s -Achse oberhalb und unterhalb der ersten Strecke platziert (Anhang A.2).

Tabelle 3.1: Chromatische Statistiken der in *Experiment I* verwendeten Stimulusfarbensets.

Wenn nur ein Wert angegeben ist, gilt dieser für alle drei Bedingungen.

Chromatische Statistik	Wert		
Einfluss der mittleren I-Chromatizität	<i>Grün</i>	<i>Neutral</i>	<i>Rot</i>
Mittlere I -Chromatizität	0.670	0.6877	0.712
Mittlere s -Chromatizität	1.1466		
Mittlere <i>Luminanz</i>	85 cd/m ²		
Einfluss der mittleren s-Chromatizität	<i>Gelb</i>	<i>Neutral</i>	<i>Blau</i>
Mittlere s -Chromatizität	0.587	1.1466	1.861
Mittlere I -Chromatizität	0.6877		
Mittlere <i>Luminanz</i>	85 cd/m ²		
Alle Bedingungen			
Standardabweichung I	0.005		
Standardabweichung s	0.1536		
Standardabweichung <i>Luminanz</i>	5.0		
Korrelation (I , <i>Luminanz</i>)	0.0		
Korrelation (s , <i>Luminanz</i>)	-0.1153		
Korrelation (I , s)	-0.2133		

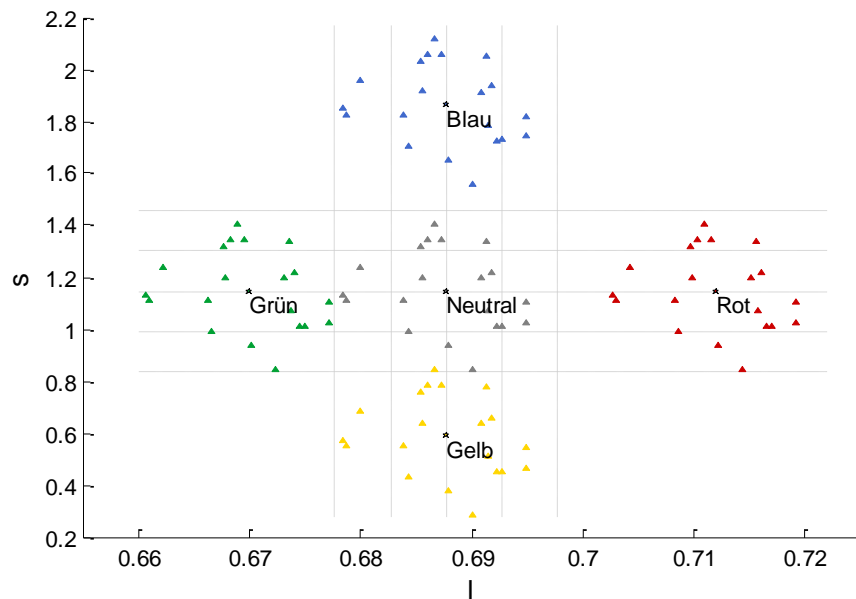


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für *Experiment I*. Die Chromatizitäten des Stimulusfarbensets sind als Dreiecke in den Farben der jeweiligen Bedingungen eingezeichnet, ★ markieren die Mittelwerte der Stimulusfarbensets. Die grauen Linien markieren die Lage der Teststrecken für die Erfassung der Grenze zwischen Rot und Grün (horizontale Linien), bzw. zwischen Blau und Gelb (vertikale Linien).

Die Staircaseabbruchintervalle wurden aufgrund der empirischen Werte einer Vorstudie festgelegt. In dieser Vorstudie wurde sowohl die Grenze zwischen Rot und Grün als auch die Grenze zwischen Blau und Gelb untersucht. Ziel war es, ein sehr sensibles Maß zur Messung der Grenze anhand der konvergierten Staircases zu verwenden und dennoch keine Abbruchkriterien zu verwenden, die zu streng sind und somit eine hohe Anzahl an Wiederholungen, ohne zusätzlichen Gewinn an Information zu erzeugen. Das für dieses Experiment ausgewählte erste Abbruchintervall hat eine Länge von fünf Wiederholungen innerhalb einer Spannweite von vier darstellbaren Farben.

Einfluss des chromatischen Mittelwerts: mittlere s -Chromatizität. Um die mittlere s -Chromatizität zu untersuchen, wurde der Mittelwert der Stimulusfarbensets auf der s -Achse zwischen den Bedingungen variiert, während die Mittelwerte der Verteilungen auf der I - und Luminanzachse konstant gehalten wurden (vgl. Tabelle 3.1, Abbildung 3.2). Die Konstruktion der Stimulusfarbensets sowie der Teststrecken zur Testfarbenauswahl wurde komplett analog zur Konstruktion im Rahmen der Messung der Gren-

ze zwischen Rot und Grün vorgenommen. Das Stimulusfarbenset der neutralen Bedingung ist exakt dasselbe wie zur Messung der Grenze zwischen Rot und Grün. Nur die Klassifikationskategorien der Aufgabe und die Lage der verwendeten Staircase-Teststrecken unterschied sich. Die Stimulusfarbensets der blauen und der gelben Bedingung sind aus Vergleichsgründen wiederum auf dasselbe Set von Zufallswerten basiert, das auch in der neutralen Bedingung verwendet wurde. Zur Generierung der gelben und blauen Bedingung wurde das Set entlang der s -Achse so verschoben, dass der Mittelwert der blauen Bedingung auf der s -Achse ($s = 1.861$) dem einer Beleuchtung von 20 000 K entspricht, und in der gelben Bedingung dem einer Beleuchtung von 4000 K ($s = 0.587$). Daher zeigen die Stimulusfarben Sets eine Verteilung der I -Werte, die eine Normalverteilung approximiert, wobei alle Werte innerhalb von zwei Standardabweichungen zum chromatischen Mittelwert der Verteilung auf der I -Achse liegen. Die Verteilung der s -Werte war wiederum in allen drei Bedingungen leicht schief, ihre Verteilung im (I, s) -Diagramm zufriedenstellend.

Ablauf und Aufgabe. Der Ablauf in diesem Experiment entspricht dem im allgemeinen Paradigma erläuterten. Die Versuchspersonen erhielten eine schriftliche Instruktion am Monitor. Die Messung der Grenze zwischen Rot und Grün und die der Grenze zwischen Blau und Gelb wurden in unterschiedlichen Sitzungen durchgeführt, um Konfundierungen und Missverständnisse bezüglich der Aufgabe zu vermeiden. Innerhalb einer Sitzung wurden die Durchgänge nach Bedingungen (gelb, neutral, blau) gruppiert, innerhalb jeder Bedingung war die Reihenfolge der fünf Durchgänge zufällig. Nach der Präsentation der 15 Durchgänge, wurden dieselben Durchgänge nochmals in umgekehrter Reihenfolge präsentiert. Diese Sequenzierung wurde zur Kontrolle möglicher längerfristig wirkender Einflüsse von vorangehenden Durchgängen eingeführt, beispielsweise in Form langsamer Adaptationsprozesse. Zwischen zwei Durchgängen lag eine Pause von 5s, nach jedem 5. Durchgang hatte die Versuchsperson die Möglichkeit, eine Pause zu machen und im Anschluss den nächsten Durchgang selbstständig zu starten. Diese Möglichkeit, längere Pausen zu machen, wurde eingeführt, nachdem Versuchsperson 4, die als Erste mit der Bearbeitung begann, nach der Bearbeitung der ersten Sitzung diese als sehr anstrengend bezeichnete. Die Datenerhebungsphase für die 30 Durchgänge dauerte für die Rot-Grün Grenze im Schnitt 1.7 Stunden, für die Erhebung der Blau-Gelb Grenze im Schnitt 2.4 Stunden.

Vier Versuchspersonen, drei männliche und eine weibliche, mit einem durchschnittlichen Alter von 29 Jahren nahmen an diesem Experiment teil, allen waren das Ziel der Untersuchung und die Hypothesen unbekannt. Die Teilnehmer hatten normale oder zu normal korrigierte Sehschärfe und zeigten keine Farbfehlsichtigkeiten gemäß

Ishihara Test for Colour Blindness (Ishihara, 1967). Die Versuchspersonen wurden mit acht Euro pro Stunde für ihren Aufwand belohnt.

3.2.1 Ergebnisse – Experiment I

Einfluss des chromatischen Mittelwerts: mittlere I -Chromatizität. Die Ergebnisse für die Messung der Grenze zwischen Rot und Grün zeigen eine Verschiebung der Grenze in Richtung des chromatischen Mittelwertes des zuvor präsentierten Stimulusfarbensets. Die Grenzen, die in Abbildung 3.3 dargestellt werden, zeigen den Mittelwert der (beiden) Rohdatenpunkte pro Teststrecke und Bedingung. Die Verschiebungen der Grenze sind zwischen den Bedingungen so stark ausgeprägt, dass drei klar voneinander trennbare Bereiche lokalisiert werden können. Die gemessene Farbkategorienengrenze verläuft nicht exakt vertikal entlang der s -Achse im MLB-Chromatizitätsdiagramm. Die oblique Form der Grenze zwischen Rot und Grün spiegelt den Fakt wieder, dass die Linie der Chromatizitäten, die weder rot noch grün erscheinen, nicht identisch mit der s -Achse ist. Die Rohdaten zeigen leichte Varianz zwischen den Wiederholungen pro Bedingung und Teststrecke.

Um die Größe des Effektes einordnen zu können, wird ein Farbkonstanzindex beschrieben. Er besteht aus dem Vergleich der roten (oder entsprechend grünen) Bedingung einer Teststrecke mit der neutralen derselben Teststrecke. Dazu wird die Differenz der erzeugten Grenzverschiebung zwischen der roten bzw. grünen Bedingung ($l_{Grenze_{Bedingung}}$) und der neutralen Bedingung ($l_{Grenze_{Neutral}}$) in Relation zur Differenz der Mittelwerte der dazugehörigen Stimulusfarbensets (Gleichung 3.1) gesetzt.

$$CC_{RG} = \frac{(l_{Grenze_{Bedingung}} - l_{Grenze_{Neutral}})}{(l_{DCS_{Bedingung}} - l_{DCS_{Neutral}})} \quad 3.1$$

Für die rote Bedingung liegen diese Farbkonstanzindizes im Mittel aller Probanden zwischen 0.73 und 0.84, für die grüne Bedingung zwischen 0.75 und 0.84 (vgl. Anhang A.3). Somit verhalten sich die Werte zwischen beiden Bedingungen ähnlich und bewegen sich auf demselben hohen Konstanzniveau.

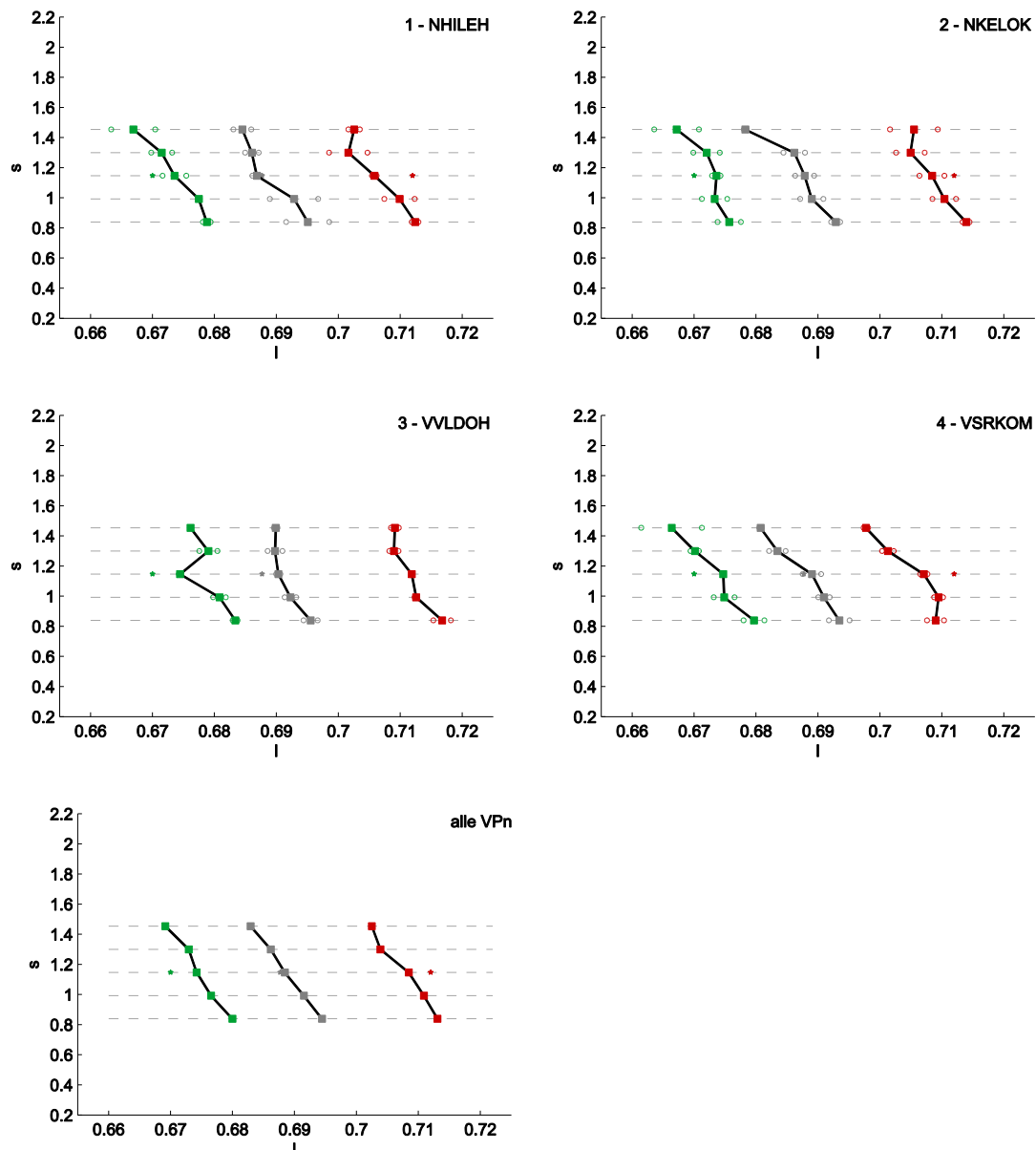


Abbildung 3.3: Ergebnisse für die Grenze zwischen Rot und Grün in *Experiment I*. Mittelwerte für alle Bedingungen (■ Neutral, ■ Rot, ■ Grün) per Teststrecke. Die Rohdatenpunkte sind als Kreise eingezeichnet (○ Neutral, ○ Rot, ○ Grün), ★ markieren die Mittelwerte der Stimulusfarbensets. Für Mittelwerte über alle Versuchspersonen wurde das arithmetische Mittel aus allen Einzelwerten (Rohdatenpunkte) pro Bedingung berechnet.

Einfluss des chromatischen Mittelwerts: mittlere s -Chromatizität. Die Ergebnisse der Untersuchung der Grenze zwischen Blau und Gelb zeigen ebenfalls eine Verschiebung in Richtung des Mittelwertes des zuvor präsentierten Stimulusfarbensets. Drei entlang der s -Achse vertikal getrennte Bereiche können lokalisiert werden. Die Grenzen, die in Abbildung 3.4 dargestellt werden, wurden durch die Berechnung des Mit-

telwertes aus den Rohdatenpunkten für jede Teststrecke und jede Bedingung ermittelt. Hierbei zeigen sich jedoch für einige Versuchspersonen große Unterschiede zwischen den Rohdatenwerten innerhalb einer Bedingung und einer Teststrecke. Aufgrund der wenigen Messungen nehmen diese starken Unterschiede, die eine große Menge Fehlervarianz anzeigen, großen Einfluss auf die Schätzung der Grenze zwischen blau und gelb. Der prominenteste Fall ist in Abbildung 3.4 bei Versuchsperson 2 in der gelben Bedingung der zentralen und der +1SD entfernten ($LL+1SD$: $I = 0.6927$, $s = 0.2798$, $Luminanz = 85$; $UL+1SD$: $I = 0.6927$, $s = 2.1682$, $Luminanz = 85$) Teststrecke zu finden. Von den diesen Schätzungen zu Grunde liegenden Rohdatenpunkten ist jeweils ein Rohdatenpunkt im gleichen Bereich der Rohdatenpunkte anderer Teststrecken der gelben Bedingung, während der andere Rohdatenpunkt weit oberhalb der Rohdatenpunkte der neutralen Bedingung liegt.

Auch für die Berechnung der Grenze zwischen Blau und Gelb werden Farbkonstanzindizes nach dem Vorbild der in Gleichung 3.1 dargestellten Konstanzindizes berechnet (vgl. Gleichung 3.2). Anhang A.3 gibt einen Überblick über die ermittelten Farbkonstanzindizes:

$$CC_{Bgb} = \frac{(S_{GrenzeBedingung} - S_{GrenzeNeutral})}{(S_{DCSBedingung} - S_{DCSNeutral})} \quad 3.2$$

Die über alle Teilnehmer gemittelten Farbkonstanzindizes für die gelbe Bedingung liegen zwischen 0.5 und 0.8, die für die blaue Bedingung zwischen 0.6 und 0.85. Das maximal erreichte Konstanzniveau ist somit vergleichbar mit den Konstanzwerten, die bei der Untersuchung des Einflusses der mittleren I -Chromatizität gemessen wurden, jedoch wird dieses Niveau, wie Abbildung 3.4 deutlich macht, nicht bei allen Teststrecken erreicht.

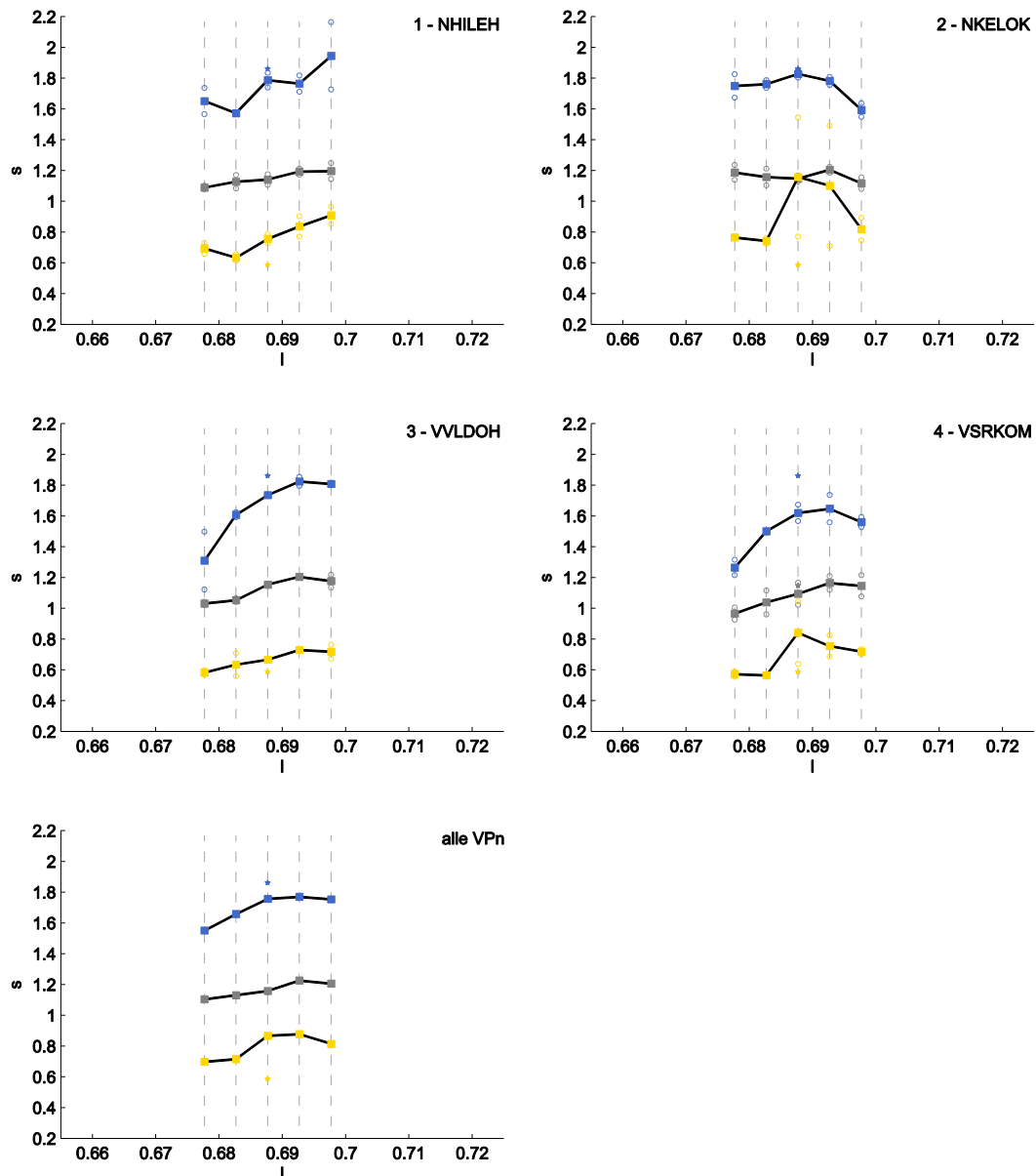


Abbildung 3.4: Ergebnisse für die Grenze zwischen Blau und Gelb in *Experiment I*. Mittelwerte für alle Bedingungen (■ Neutral, ■ Blau, ■ Gelb) per Teststrecke. Die Rohdatenpunkte sind als Kreise eingezeichnet (○ Neutral, ○ Blau, ○ Gelb), ★ markieren die Mittelwerte der Stimulusfarbensets. Für Mittelwerte über alle Versuchspersonen wurde das arithmetische Mittel aus allen Einzelwerten (Rohdatenpunkte) pro Bedingung berechnet.

3.2.2 Diskussion – Experiment I

Die Rohdatenpunkte zeigten abgesehen von wenigen Ausreißern geringe Unterschiede zwischen den beiden Messungen pro Bedingung und Teststrecke. Die Gründe für diese Unterschiede können Messfehler, Müdigkeit oder langsame Adaptationseffekte sein. Daher kann sich das Balancieren der Durchgangsreihenfolgen als sehr nützlich erweisen. Die großen Unterschiede zwischen Rohdatenpunkten, die in einigen wenigen Bedingungen gefunden wurden, könnten auf Effekten der Müdigkeit und einer daraus resultierenden ungenauen Bearbeitung beruhen.

Der Vergleich der Mittelwerte zeigt klar voneinander trennbare Lokationen der Grenzen für alle fünf Bedingungen. Innerhalb des Beleuchtungsschätzungsansatzes wird dies dergestalt interpretiert, dass der chromatische Mittelwert als eine chromatische Szenenstatistik dient, die zur Beleuchtungsschätzung verwendet wird. Jedoch können diese Ergebnisse außerhalb des Beleuchtungsschätzungsansatzes auch in anderer Weise interpretiert werden. Ein rein adaptationaler Blickwinkel, wie er beispielsweise von Uchikawa, Uchikawa und Boynton (1989) für möglich gehalten wurde, würde dieselben Ergebnisse vorhersagen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine kritische Entscheidung zugunsten eines von beiden Ansätzen nicht möglich ist, da die obigen Ergebnisse mit den Vorhersagen beider Ansätze vereinbar sind.

Aus methodischer Sicht muss kritisch angemerkt werden, dass die Teilnehmer das Experiment als sehr anstrengend empfunden haben. Um dies zu reduzieren und somit eine Erhöhung der Fehlervarianz durch Müdigkeit entgegenzuwirken, müssen mehr Möglichkeiten zur Pause gegeben werden. Dies wurde in den nachfolgenden Experimenten umgesetzt.

Die Farbkonstanzindizes helfen bei der Einordnung der Größe der Effekte. Die hohen Werte der Farbkonstanzindizes sind mit Konstanzwerten bei der räumlichen Integration visueller Information vergleichbar. So zeigten beispielsweise Kraft und Brainard (1999), dass durch das Ausschließen des chromatischen Mittelwerts als hilfreichen cue bei der räumlichen Integration visueller Information der erreichte Konstanzwert in einer Szene mittlerer Komplexität von .83 auf .39³⁶ sank, was für die Wichtigkeit des chromatischen Mittelwerts als Hinweisreiz bei der räumlichen Integration spricht. Arend (1993) untersuchte mit einer Klassifikationsmethode, die der in *Experiment I* verwendeten ähnlich ist, die Informationsintegration im räumlichen Kon-

³⁶ Kraft und Brainard (1999) berechnen diesen Index, indem sie die Verschiebung der Chromatizität der als achromatisch eingestellten Testfelder mit der Verschiebung der Chromatizität der Beleuchtungen in Relation setzen.

text. Foster (2011) berichtet für diese Ergebnisse einen berechneten Farbkonstanzindex von .6³⁷.

Im zeitlichen Kontext bietet es sich an, die Farbkonstanzindizes der Arbeiten von Schultz et al. (2006), sowie die der Arbeit von Smithson und Zaidi (2004) zu betrachten (vgl. Abschnitt 2.4), wobei beide Arbeiten im Hinblick auf die untersuchten cues und die Berechnung der Farbkonstanzindizes von *Experiment I* abweichen. In der Arbeit von Schultz et al. zeigen sich Farbkonstanzindizes mit einer deutlichen Abhängigkeit von der Beleuchtungsbedingung. Hier zeigt sich, dass für eine gelbliche Beleuchtung geringer Farbkonstanzindizes erreicht wurden, als für eine bläuliche Beleuchtung. Dies ist eine Parallele zu den hier vorliegenden Ergebnissen. Die Arbeit von Smithson und Zaidi, zeigt starke Schwankungen zwischen den Versuchspersonen im Hinblick auf die erreichte Farbkonstanz. Solche versuchspersonenspezifischen Unterschiede sind auch in den Ergebnissen von *Experiment I* ansatzweise erkennbar.

Somit zeigt sich, dass sich die Ergebnisse aus *Experiment I* gut in das bisherige Bild zum Erreichen von Farbkonstanz einfügen und trotz der großen Streuung in der gelben Bedingung eine gute Beschreibung für die Rolle des chromatischen Mittelwerts bei der temporalen Informationsintegration darstellen. Die Farbkonstanzindizes in substantieller Höhe weisen zudem auf die Wichtigkeit dieses Hinweisreizes hin.

3.3 Experiment II. Untersuchung der Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation als chromatische Szenenstatistik, die bei der temporalen Informationsintegration verwendet wird

In diesem Experiment wird untersucht, ob die in der visuellen Szene vorhandene Regularität, die durch die Korrelation von Luminanz und Rötlichkeit beschrieben werden kann, in einem temporal präsentierten Szenario zur Beleuchtungsschätzung verwendet wird. Die Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation (LRK) wird in Abschnitt 2.3.2.2 im Detail beschrieben. Ihr Nutzen liegt darin, dass sie bei einem gegebenen chromatischen Mittelwert zur Unterscheidung zwischen einer Szene unter rötlicher Beleuchtung und einer anderen Szene mit vielen rötlichen Oberflächen unter einer beispielsweise neutralen Beleuchtung, beitragen kann. Wichtig ist, sich dabei zu vergegenwärtigen, dass dieser Zusammenhang nur unter dem Relativ gleicher chromatischer Mittelwerte der temporalen proximalen Reize gilt.

Versuchsdesign. Um diese Vorhersage zu testen, wird die Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation auf drei Stufen variiert (positive-LRK, negative-LRK, Null-LRK), während der chromatische Mittelwert konstant gehalten wird. So wurden im Rahmen des in

³⁷ Berechnung nach Arend, Reeves, Schirillo und Goldstein (1991)

Abschnitt 3.1 vorgestellten allgemeinen Paradigmas drei Stimulusfarbensets gebildet, die sich lediglich im Hinblick auf die Ausprägung der Luminanz-Rötlichkeits-Korrelationen unterschieden und eine extrem positive, eine extrem negative oder eine Korrelation von Null besaßen. Als Untersuchungsebene wurde sich auf die *I*-Achse im MacLeod-Boynton Farbraum konzentriert, da diese den Farbeindruck zwischen wahrgenommenem Rot und wahrgenommenem Grün repräsentiert. Die Logik, die diesem Ansatz zugrunde liegt, sagt das folgende Ergebnismuster vorher. Basis ist die Idee, dass bei rötlich werdender Beleuchtung, rötliche Oberflächen höhere Luminanzen bekommen, was in einer höheren positiven Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation kodiert ist (vgl. Abschnitt 2.3.2.2). Daher sollte ein Stimulusfarbenset mit einer hohen positiven Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation zu einer rötlichen Beleuchtungsinterpretation durch das visuelle System führen. Wenn eine rötliche Beleuchtung angenommen wird, verschiebt sich die Grenze zwischen Rot und Grün in Richtung höherer Werte auf der *I*-Achse, im Vergleich zu Stimulusfarbensets mit geringeren Korrelationen, respektive einer LRK von Null oder einer negativen LRK, da ein Teil der Rötlichkeit der Testfarbe der Beleuchtung zugeschrieben wird. Analog zu dieser Argumentation sollte das Stimulusfarbenset mit einer negativen LRK zur Schätzung einer grünlicheren Beleuchtung führen.

Adaptive Messung. Da sich in *Experiment I* teilweise deutliche Unterschiede zwischen wiederholten Messpunkten gezeigt haben, wird in diesem Experiment auf die Erhebung des Verlaufs der Farbkategoriengrenze verzichtet, zu Gunsten häufigerer wiederholter Messungen eines Punktes auf der Farbkategoriengrenze. Da im Vergleich zu *Experiment I* insgesamt kleinere Effekte erwartet werden, wird mit dem Ziel die Präzision der Messung zu verbessern, indem strengere Abbruchkriterien gesetzt werden, eine zweite Änderung vorgenommen. In diesem Sinne wurde das Abbruchkriterium, auf Basis der Ergebnisse eines weiteren Vorexperiments, auf fünf aufeinanderfolgende Durchgänge innerhalb eines Intervalls mit der Spannweite eines Schrittes in jede Richtung festgesetzt. Die Endpunkte der Teststrecke, die der Testfarbenauswahl der Staircaseprozedur zu Grunde liegt wurden von *Experiment I* übernommen (E_{Untergrenze}: $I = 0.66$, $s = 1.1466$, $Luminanz = 85$; E_{Obergrenze}: $I = 0.722$, $s = 1.1466$, $Luminanz = 85$). Diese Werte wurden gewählt, um die Vergleichbarkeit mit *Experiment I* zu erhalten und um den Messbereich so groß zu gestalten, dass es zu keinerlei Deckeneffekten kommen kann.

Stimulusfarbenset. Die Stimulusfarbensets, welche die Operationalisierung der drei Bedingungen darstellen, wurden wie in Abschnitt 3.1 beschrieben erstellt. In der positive-LRK-Bedingung und in der negative-LRK-Bedingung können die angestrebten perfekt positiven ($r = +1$) bzw. perfekt negativen Korrelationen ($r = -1$) nicht umge-

setzt werden, da diese zu komplexwertigen und damit nicht darstellbaren Lösungen führen. Stattdessen wurden die nahest möglichen Korrelationen gewählt, die zu einer darstellbaren Lösung für die angestrebten Farbwertverteilungen führen (vgl. Tabelle 3.2). Jedes Stimulusfarbenset beinhaltet zwanzig Farben und kann anhand der in Tabelle 3.2 berichteten statistischen Kennziffern beschrieben werden. Zur Auswahl der Stimulusfarbensets wurden für jede Bedingung 250 zufällig gezogene Stimulusfarbensets erstellt und im Anschluss diejenigen ausgewählt, die einer Normalverteilung der I -Werte am nächsten kommen und eine große Variabilität im (I,s) -Chromatizitätsdiagramm zeigten. Für die Bedingung der Null-LRK wurde das Stimulusfarbenset der neutralen Bedingung in *Experiment I* übernommen. In diesem Experiment sind die Stimulusfarbensets aus verschiedenen Sets von Zufallswerten ausgewählt worden. Abbildung 3.5 zeigt eine graphische Aufbereitung der Stimulusfarbensets.

Tabelle 3.2: Statistische Kennwerte zur Beschreibung der Stimulusfarbensets in *Experiment II*. Ist nur ein Wert angegeben, ist dieser für alle Bedingungen gültig.

Chromatische Statistik	Wert		
Mittlere I -Chromatizität	0.6877		
Mittlere s -Chromatizität	1.1466		
Mittlere <i>Luminanz</i>	85 cd/m ²		
Standardabweichung I	0.005		
Standardabweichung s	0.1536		
Standardabweichung <i>Luminanz</i>	5.0		
Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation (Korrelation (I , <i>Luminanz</i>))	<i>positiv</i>	<i>null</i>	<i>negativ</i>
	.995*	0.0	-.945*
Korrelation (s , <i>Luminanz</i>)	-0.1153		
Korrelation (I , s)	-0.2133		

* der angestrebte Wert von -1 bzw. +1, konnte nicht exakt berechnet werden, s. Text)

Versuchsablauf. Ein Durchgang beinhaltete eine Staircaseprozedur, wobei sechs Wiederholungen jeder Bedingung in insgesamt zwei Sitzungen erhoben wurden. In der ersten Sitzung wurden drei Durchgänge mit negativer Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation erhoben, gefolgt von dreien aus der Null-LRK-Bedingung und dreien aus der positive-LRK-Bedingung. Die zweite Sitzung beinhaltete dieselben Durchgänge in

umgekehrter Reihenfolge, um langfristig wirkende Adaptationseffekte (vgl. Rinner & Gegenfurtner, 2000) und etwaige Ermüdungseffekte zu balancieren. Nach jedem dritten Durchgang hatten die Versuchspersonen eine zweiminütige Erholungspause, wobei die Versuchspersonen nicht wussten, dass die Pausen jeweils nach der Erhebung einer Korrelationsbedingung eingefügt wurden. Neben dem erwarteten Erholungseffekt sollten diese Pausen mögliche carry over Effekte zwischen den Bedingungen verhindern. Innerhalb eines solchen Blocks wurden die drei Durchgänge durch fünfsekündige Pausen getrennt.

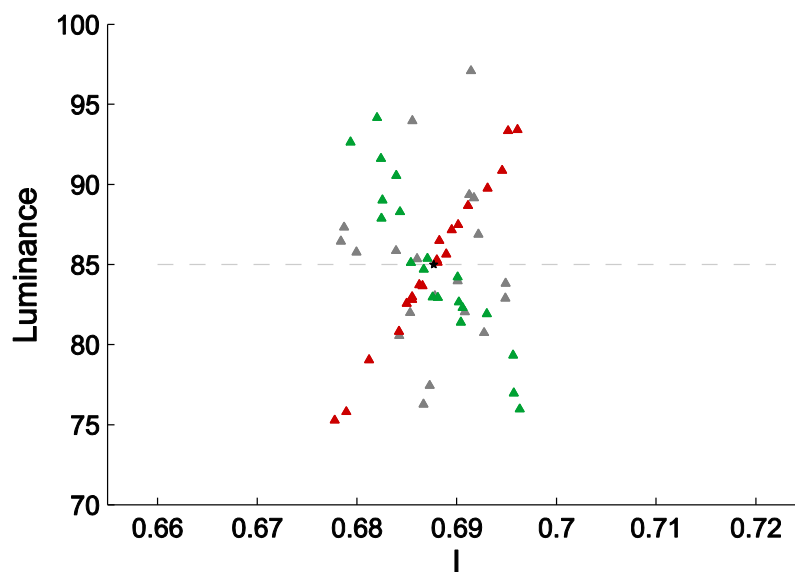


Abbildung 3.5: Stimuli für *Experiment II*. Lage der Stimulusfarben für die positive-LRK-Bedingung (▲), die Null-LRK-Bedingung (▲) und die negative-LRK-Bedingung (▲) im (L , $Luminanz$)-Diagramm. Der Stern (★) markiert den chromatischen Mittelwert der Stimulusfarbensets.

Jeder Sitzung ging eine fünfminütige Dunkelgewöhnungsphase voraus, in deren Anschluss die Versuchspersonen vom Versuchsleiter sorgfältig instruiert wurden (Anhang A.4). Während der Instruktions- und Übungsphase bestand die Möglichkeit, Fragen zu klären. Anschließend bearbeiteten die Versuchspersonen die Aufgabe selbstständig, während der Versuchsleiter den Raum verließ. Nach der vollständigen Bearbeitung der zweiten Sitzung wurde das Experiment durch ein strukturiertes Interview, in dem fünf explorative Fragen sowie demographische Angaben erhoben wurden, abgeschlossen (Anhang A.5).

Sechs Versuchspersonen nahmen an diesem Experiment teil, vier weibliche und zwei männliche im Alter zwischen 18 und 39 Jahren ($M = 25.2$ Jahre). Alle verfügten über normale oder zu normal korrigierte Sehschärfe und normale Farbsichtigkeit, die mit

dem *Ishihara test for colour blindness* (Ishihara, 1967) erhoben wurde. Versuchsperson 6 waren Ziel und Hypothesen des Experiments bekannt, den anderen Teilnehmern nicht.

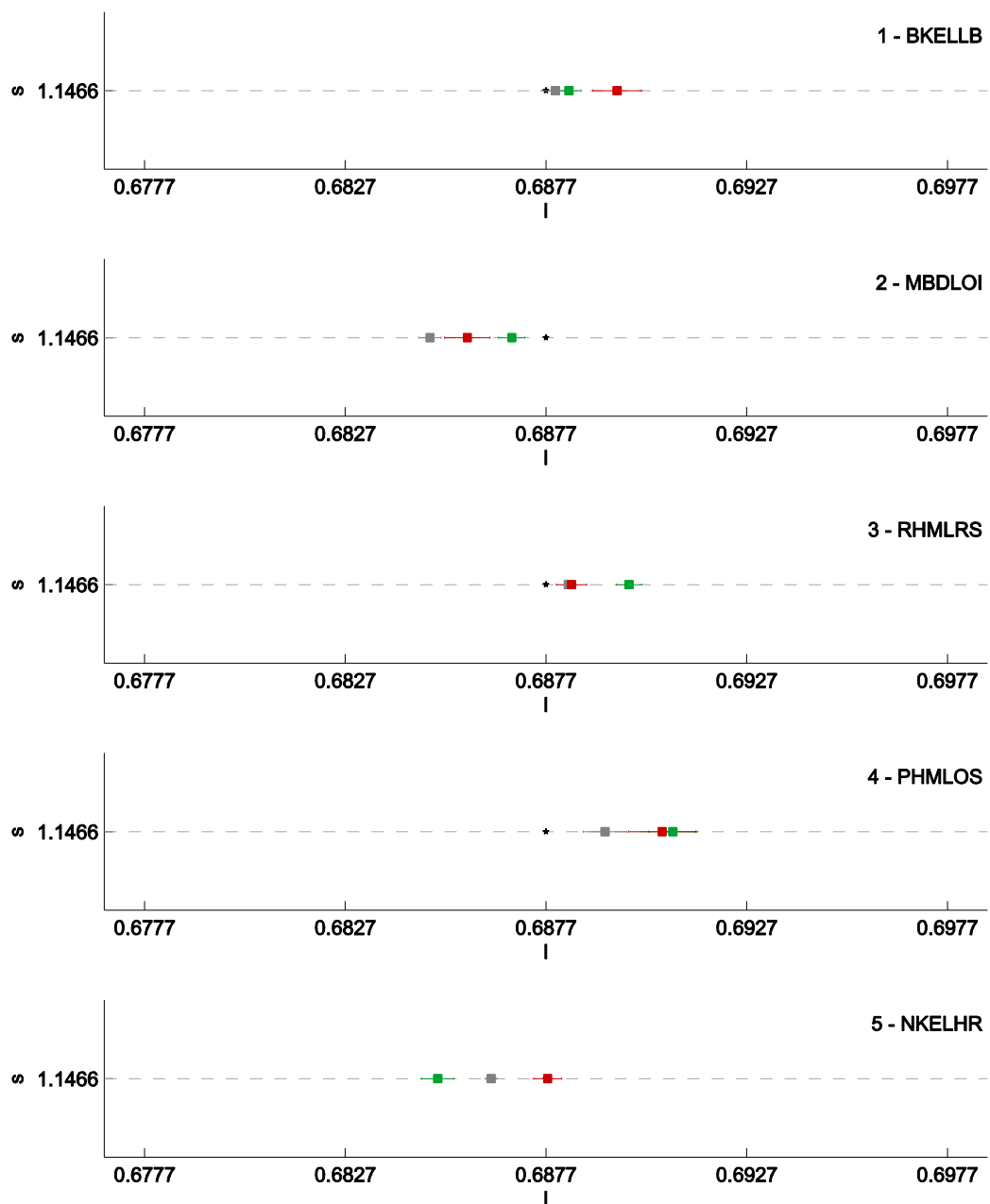
3.3.1 Ergebnisse – Experiment II

Korrespondierend zu den oben beschriebenen Ausführungen wird das folgende Ergebnismuster erwartet: Die vorangegangene Präsentation eines Farbsets mit positiver Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation sollte zu einer Verschiebung der Grenze zwischen Rot und Grün in Richtung höherer I -Werte führen, im Vergleich zu einer Grenze zwischen Rot und Grün, die nach der Präsentation eines Stimulusfarbensets gemessen wurde, das eine Nullkorrelation oder eine negative Korrelation aufwies. Des Weiteren sollte die Null-LRK-Bedingung zu höheren I -Werten bei der Messung der Grenze zwischen Rot und Grün führen als die negative-LRK-Bedingung.

Deskriptive Datenanalyse. Die Ergebnisse zeigen ein inkonsistentes Bild. Einerseits zeigt die Datenanalyse zwei Versuchspersonen, die das erwartete Ergebnismuster zeigen (Versuchspersonen 5 und 6, Abbildung 3.6). Jedoch zeigen die Versuchspersonen 1 bis 4 bei der deskriptiven Datenanalyse unerwartete Ergebnismuster. Versuchsperson 1 zeigt ein teilweise inkonsistentes Ergebnismuster im Hinblick auf die Bedingungen negative-LRK und Null-LRK. Der mittlere I -Wert der negative-LRK-Bedingung ist höher als der der Null-LRK-Bedingung. Bei Betrachtung der Rohdaten wird deutlich, dass die gemessenen Staircaserohdaten der beiden Bedingungen sich stark überschneiden. Für die Versuchspersonen 2 bis 4 liegt die geschätzte Grenze zwischen Rot und Grün der negative-LRK-Bedingung oberhalb der der positive-LRK-Bedingung sowie der der Null-LRK-Bedingung (Abbildung 3.6; Anhang A.6). Die geringsten I -Werte wurden für die Null-Korrelations-Bedingung gemessen.

Inferenzstatistische Datenanalyse. Die Daten wurden mit einem gemischten Modell für komplette Messwiederholungen und wiederholte Beobachtungen in jeder Experimentalbedingung analysiert (*Mixed Effects Model for a replicated, blocked design*). Die drei experimentell variierten Luminanz-Rötlichkeits-Korrelations-Bedingungen werden dabei als fester Faktor (fixed effect) behandelt, während die Versuchspersonen als Zufallsfaktor (random effect) behandelt werden, um die verschiedenen Varianzquellen adäquat zu modellieren. Dieses Modell wird im Folgenden als das einfache Modell bezeichnet. Zudem wird ein zweites Modell modelliert, das zusätzlich eine Interaktion zwischen den Korrelationsbedingungen und den Versuchspersonen annimmt. Dieses Modell wird als spezifisches Modell bezeichnet. Das Alpha-Niveau wird a priori auf 0.05 gelegt. Die Analysen wurden mit R (Version 2.14.2), entlang der Empfehlungen in Pinheiro und Bates (2000) ausgeführt.

Der Vergleich beider Modelle zeigt einen signifikant besseren Fit des spezifischen Modells ($AIC_{\text{simple}} = -1063.343$, $AIC_{\text{specific}} = -1078.892$, $p < 0.001$), was mit den Ergebnissen der deskriptiven Analyse korrespondiert. Daher wurden die Hypothesentests auf Basis des spezifischen Modells ausgeführt. Die Hypothesen wurden mit Hilfe von umgekehrten Helmert-Kontrasten getestet, wobei kein signifikanter Unterschied festgestellt werden konnte, weder zwischen der negative-LRK- und der Null-LRK-Bedingung ($t_{(10)} = -0.8381$, $p = 0.211$), noch zwischen dem Mittel aus negative-LRK- und Null-LRK-Bedingung und der positive-LRK-Bedingung ($t_{(10)} = 1.5451$, $p = 0.077$).



f.

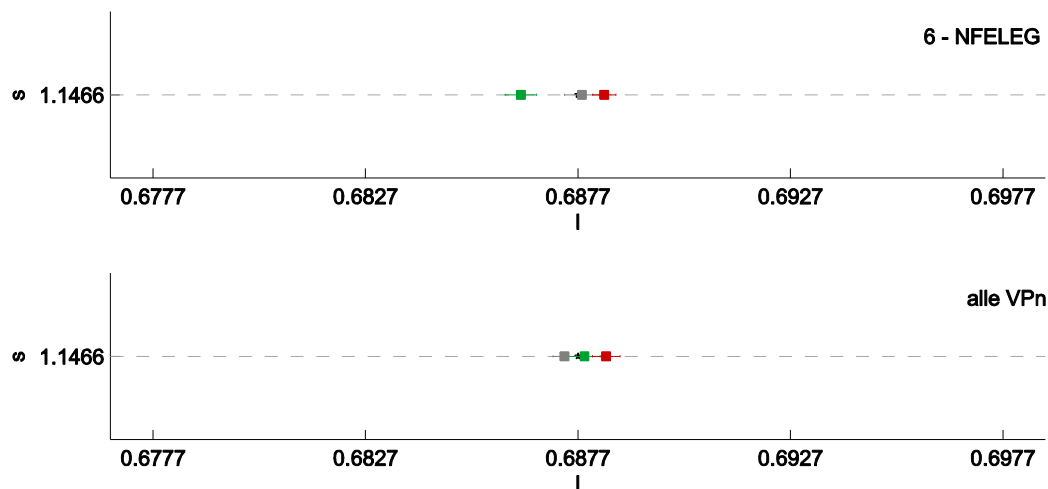


Abbildung 3.6: Ergebnisse für *Experiment II*. Die Quadrate zeigen die errechneten Kategoriengrenzen für die positive-LRK-Bedingung (■), die negative-LRK-Bedingung (■) und die Null-LRK-Bedingung (■). Die Balken zeigen den Standardfehler des Mittelwerts und ★ markiert die Mittelwerte der Stimulusfarbensets. Für Mittelwerte über alle Versuchspersonen wurde das arithmetische Mittel aus allen Einzelwerten (Rohdatenpunkte) pro Bedingung berechnet.

3.3.2 Diskussion – Experiment II

Die Ergebnisse führen zu der Schlussfolgerung, dass die Alternativhypothese, welche besagt, dass die mittlere Chromatizität des als neutral wahrgenommenen Bereiches mit steigender Positivität der Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation ebenfalls ansteigt, nicht akzeptiert werden kann, da die Nullhypothese nicht verworfen werden konnte. Mögliche Gründe können in der für einen untrainierten Beobachter geringen Anzahl an Wiederholungen liegen, die zu der starken Überlappung der Rohdaten zwischen den Bedingungen geführt haben könnte. Eine größere Anzahl von Wiederholungen würde helfen, die Genauigkeit der Schätzung der mittleren Chromatizität zu verbessern und die Teststärke zu erhöhen.

Die Modellierung deutet eine Interaktion zwischen der Versuchsperson und der unabhängigen Variablen an, was deutlich wird, wenn man die Ergebnismuster der Teilnehmer 5 und 6 mit den Ergebnismustern der Teilnehmer 1 bis 4 vergleicht. Dies legt die Annahme nahe, dass es interindividuelle Unterschiede bei der Ausführung der Aufgabe gegeben haben könnte. Die Interviewdaten sprechen weder für noch gegen diese Schlussfolgerung.

Im nächsten Schritt soll das Experiment noch einmal wiederholt werden. Zur Verbesserung der Genauigkeit der Schätzungen soll die Anzahl der Messungen pro Bedingung erhöht werden.

3.4 Experiment III. Untersuchung der Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation als chromatische Szenenstatistik bei der temporalen Informationsintegration

Auf Grund der nicht eindeutigen Ergebnisse in *Experiment II* wurde zur erneuten Prüfung *Experiment III* gemacht. Die vorgestellte Hypothese, dass die Korrelation zwischen Luminanz und Rötlichkeit, die in temporal präsentierter visueller Information enthalten ist, eine nützliche Information für den Beleuchtungsschätzungsprozess ist, bleibt erhalten. Der grundlegende Versuchsaufbau mit den drei Bedingungen wird ebenfalls aus *Experiment II* übernommen, sodass der Effekt der Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation auf die Grenze zwischen Rot und Grün durch den Vergleich der Effekte der drei Bedingungen bestimmt wird. Diese Bedingungen sind die positive-LRK-Bedingung, die eine positive Korrelation zwischen Luminanz und Rötlichkeit beschreibt, die negative-LRK-Bedingung sowie die Null-LRK-Bedingung. Der Versuchsaufbau repliziert den aus *Experiment II* im Hinblick auf die meisten Aspekte, jedoch wurden einige geringfügige Veränderungen vorgenommen, um mögliche Alternativerklärungen auszuschließen und um die Werkzeuge zur Detektion des Effekts zu verbessern.

3.4.1 Veränderungen am Versuchsaufbau in Experiment III

Adaptive Messung. Auf Grund der Erfahrung in *Experiment II*, dass die äußeren Bereiche der Teststrecke keine gemessenen Grenzen beinhalteten, wurde die Teststrecke verkürzt. Die Endpunkte wurden 2,5 SD vom Mittelwert des Stimulusfarbensets entfernt gesetzt ($E_{\text{Unten}}: I = 0.6627, s = 1.1466, \text{Luminanz} = 85$) ($E_{\text{Oben}}: I = 0.7127, s = 1.1466, \text{Luminanz} = 85$), sodass die Teststrecke parallel zur I -Achse verlief und immer noch sämtliche Rohdatenpunkte aus *Experiment II* abbilden konnte. Das Abbruchkriterium aus *Experiment II* wurde beibehalten, was bedeutet, nach fünf aufeinanderfolgenden Urteilen innerhalb einer Spannweite von einer Farbe in jede Richtung, das Abbruchkriterium erfüllt war.

Stimulusfarbenset. Die Mittelwerte und Korrelationswerte für die Stimulusfarbensets wurden aus *Experiment II* übernommen. Die Standardabweichungen der Stimulusfarbensets wurden vergrößert, um eine größere Varianz der Farben zu erreichen. Die Standardabweichungen für die I - und s -Werte wurden verdoppelt, die für die *Luminanz* verdreifacht (Abbildung 3.7). Die ausgewählten Stimulusfarbensets werden in Tabelle 3.3 beschrieben. Ihnen liegen jeweils die gleichen zufällig gezogenen Farbwerte zu Grunde.

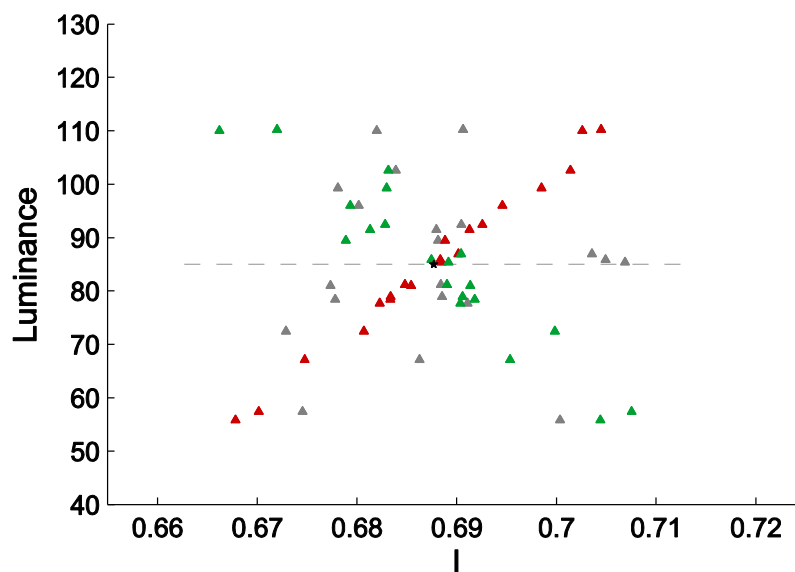


Abbildung 3.7: Stimuli für Experiment III. Lage der Stimulusfarben für die positive-LRK-Bedingung (▲), die Null-LRK-Bedingung (▲) und die negative-LRK-Bedingung (▲) im (I , *Luminanz*)-Diagramm. Der Stern (★) markiert die chromatischen Mittelwerte der Stimulusfarbensets.

Um Adaptation als eine Erklärung für die Ergebnisse auszuschließen, unterschieden sich die drei ausgewählten Stimulusfarbensets einzig im Hinblick auf die Korrelation zwischen Luminanz und Rötlichkeit. Durch das Design wurden weitere Anstrengungen vorgenommen, um Fehlervarianz zu reduzieren und insbesondere mögliche systematische Fehlervarianz zu vermeiden. Alle Strategien zur Kontrolle von Fehlervarianz wurden in jeder Bedingung implementiert. Als mögliche Quellen von Fehlervarianz wurden zum einen Effekte auf Grund von Gewichtungen der Stimulusfarben, - was einen möglichen Einfluss auf die temporale Informationsintegration haben könnte - und zu diesem Zeitpunkt nicht ausgeschlossen werden konnte, identifiziert und durch Balancierung kontrolliert. Eine weitere mögliche Störgröße wäre eine Sequenz von Farben, die einen ähnlichen I -Wert haben und zu der Schlussfolgerung führen könnten, dass ein Beleuchtungswechsel stattgefunden habe, was sich insbesondere am Ende eines Stimulusfarbensets stark auf die Messung auswirken würde.

Konkret wurden folgende Maßnahmen ergriffen, um mögliche Störvariablen zu kontrollieren: Um die Datenbasis zu stärken und die Teststärke zu erhöhen, bearbeitete jede Versuchsperson 16 Staircases pro Bedingung. Die Stimulusfarbensets dieser drei Bedingungen basieren auf den gleichen zufällig gezogenen Farben (Details zur Ziehung finden sich in Abschnitt 3.1). Um mögliche nicht intendierte Auswirkungen der Stimulusfarbenreihenfolge zu vermeiden, wurde die Reihenfolge in der Stimulusfarbensequenz zwischen den Staircases einer Bedingung variiert. Die generierten ver-

schiedenen Reihenfolgen, wurden in allen drei Bedingungen verwendet. Hierzu wurden acht zufällig gezogene Reihenfolgen zweimal pro Bedingung präsentiert. Diese acht Reihenfolgen passen zu allen im Folgenden präsentierten Anforderungen. Innerhalb jeder Reihenfolge mussten die drei letzten Farben eine Mindestdistanz zueinander aufweisen. So musste die Farbe einer Bedingung mindestens drei darstellbare Farben von den Farben in der anderen Bedingung entfernt sein. Dieses Kriterium wurde aufgrund von Erfahrungen in einem hier nicht berichteten Experiment eingeführt (Hirschmueller & Golz, 2011). Des Weiteren sollten von den sechs letzten Farben in einer Reihenfolge drei unterhalb des Mittelwerts des Stimulusfarbensets präsentiert werden, sowie drei oberhalb. Somit repräsentieren die letzten sechs Farben eines Stimulusfarbensets den Mittelwert in adäquater Weise. Zudem sollte die Präsentationsreihenfolge innerhalb der letzten sechs Farben zumindest zweimal zwischen beiden Seiten des Mittelwerts wechseln, um den Eindruck eines Beleuchtungswechsels durch zu viele zu ähnliche Stimulusfarben zu vermeiden.

Tabelle 3.3: Chromatische Kennwerte für die Stimulusfarbensets in *Experiment III*. Wenn nur ein Wert angegeben wird, gilt dieser für alle Bedingungen.

Chromatische Statistik	Wert		
Mittlere <i>I</i> -Chromatizität	0.6877		
Mittlere <i>s</i> -Chromatizität	1.1466		
Mittlere <i>Luminanz</i>	85 cd/m ²		
Standardabweichung <i>I</i>	(0.005 * 2) = 0.01		
Standardabweichung <i>s</i>	(0.1536 * 2) = 0.3072		
Standardabweichung <i>Luminanz</i>	(5.0 * 3) = 15.0		
Korrelation (<i>I</i> , <i>Luminanz</i>)	<i>positiv</i> .995 ^a	<i>null</i> 0.0	<i>negativ</i> -.945 ^a
Korrelation (<i>s</i> , <i>Luminanz</i>)	-0.1153		
Korrelation (<i>I</i> , <i>s</i>)	-0.2133		

^a der angestrebte Wert von -1 bzw. +1, konnte nicht exakt berechnet werden (vgl. *Experiment II*)

Versuchsaufbau. Die Erhebung der 16 Durchgänge pro Bedingung und somit von insgesamt 48 Durchgängen wurde in vier Sitzungen aufgeteilt. Hierbei wurden vier Durchgänge jeder Bedingung en bloc erhoben, in der darauffolgenden Sitzung wurde die Reihenfolge umgekehrt. Nach jedem vierten Durchgang hatten die Versuchssper-

sonen zwei Minuten Pause zur Erholung. Den Versuchspersonen wurde nicht gesagt, dass die Einteilung ebenfalls die Erhebungsbedingungen trennte, um den möglichen Einfluss von adaptationalen carry over Effekten zu minimieren. Zwischen den Durchgängen eines Blocks wurden 5 sekundige Unterbrechungen gemacht. Die Versuchspersonen bearbeiteten einen Übungsdurchgang, bevor sie mit den zwölf Durchgängen einer Sitzung begannen.

Zu Beginn jeder Sitzung saß die Versuchsperson für fünf Minuten im abgedunkelten Versuchsraum, um sich an die experimentelle Situation zu gewöhnen. Dann wurde sie vom Versuchsleiter sorgfältig mündlich instruiert³⁸ und hatte die Möglichkeit, währenddessen oder während der Bearbeitung des Übungsdurchgangs mögliche Fragen zur Aufgabe zu klären. Im Anschluss bearbeitete die Versuchsperson die Aufgabe selbstständig. Nach der Bearbeitung der vierten Sitzung beantworteten die Versuchspersonen in einem strukturierten Interview zehn explorative Fragen im Hinblick auf ihre Bearbeitung der Aufgabe (Anhang A.7).

Neun Personen nahmen an diesem Experiment teil, 7 weibliche und 2 männliche zwischen 19 und 23 Jahren (Mittleres Alter 19.9 Jahre). Alle Versuchspersonen hatten normale oder zu normal korrigierte Sehschärfe und normale Farbsichtigkeit getestet mit dem *Ishihara test for colour blindness*, (Ishihara, 1967). Den Versuchspersonen waren die Ziele und Hypothesen des Experiments unbekannt.

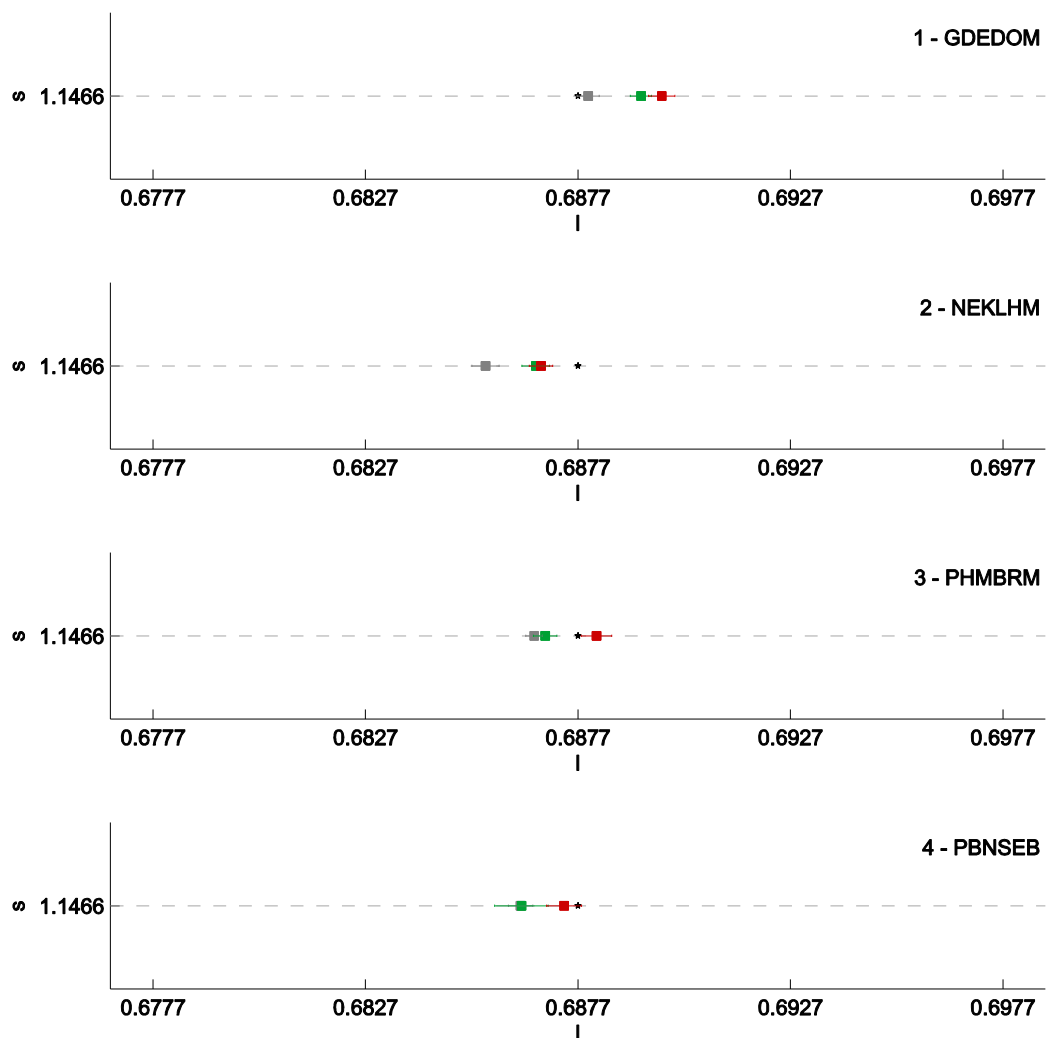
3.4.2 Ergebnisse – Experiment III

Deskriptive Datenanalyse. Versuchsperson 9 arbeitete deutlich länger an den Sitzungen als die anderen Versuchspersonen, was auf eine sehr hohe Zahl an Antworteingaben zurückzuführen war, bis ein Abbruchkriterium erreicht wurde und der Staircase beendet werden konnte (Durchschnittlich benötigte Anzahl Antworteingaben pro Staircase: $M_{\text{Antworteingaben_VP9}} = 108.38$, $SD_{\text{Antworteingaben_VP9}} = 57.40$, $M_{\text{Antworteingaben_VP1-8}} = 48.57$, $SD_{\text{Antworteingaben_VP1-8}} = 22.51$). Die Inspektion des Staircaseverlaufs innerhalb der Durchgänge ergab, dass die beiden Treppen meistens nicht vollständig konvergierten und daher das Abbruchkriterium nur erfüllt wurde, wenn die gleiche Treppe zufälligerweise mehrere Male hintereinander präsentiert wurde (Anhang A.8). Somit sind die in diesem Experiment verwendeten Messinstrumente nicht geeignet, um das Verhalten der Versuchsperson 9 zu messen, weshalb diese Versuchsperson im Folgenden von der Datenanalyse ausgeschlossen wird. Jedoch ist eine deskriptive Ergebnisdar-

³⁸ Die Instruktion erfolgte mündlich und folgte in wesentlichen Zügen der in *Experiment II*. Die Aufgabenstellung war exakt gleich formuliert. Vor der Instruktion wurde ein „Spaziergang durch den Farbraum“ durchgeführt. Dabei wurden der Versuchsperson Farben entlang der *I*- und der *s*- Achse gezeigt. Der Versuchsleiter verhielt sich dabei neutral.

stellung in Anhang A.9 zu finden. Eine mögliche Erklärung für das nicht Konvergieren der beiden Staircasetreppen wäre, dass Versuchsperson 9 einen deutlich breiteren indifferenten Bereich zwischen Rot und Grün hat.

Wie in *Experiment I* und *II* wurde die Grenze zwischen Rot und Grün durch den Mittelwert der Rohdatenpunkte für jede Bedingung geschätzt (Abbildung 3.8, Anhang A.10). Versuchsperson 8 zeigt die erwarteten Ergebnisse. Die Versuchspersonen 1 bis 7 zeigen jeweils die höchsten mittleren I -Werte für die positive-LRK-Bedingung. Jedoch sind die Mittelwerte für die negative-LRK-Bedingung höher als die mittleren I -Werte für die Null-LRK-Bedingung, was dem vorhergesagten Ergebnis widerspricht. Bei Betrachtung der Rohdatenpunkte auf Versuchspersonenebene wird sichtbar, dass die Rohdatenpunkte der verschiedenen Bedingungen sich teilweise überschneiden.



f.

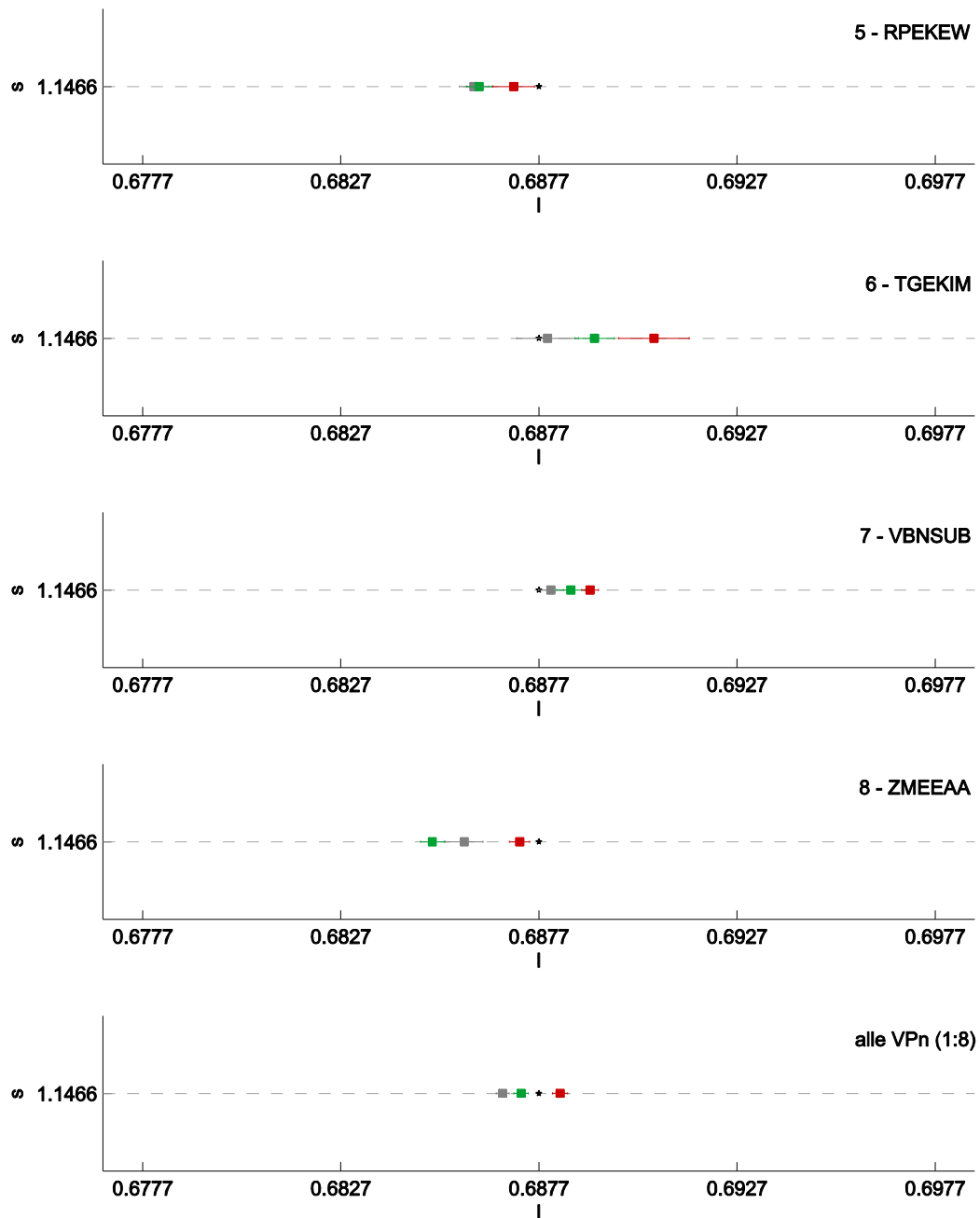


Abbildung 3.8: Ergebnisse für *Experiment III*. Die Quadrate zeigen die durch den Mittelwert geschätzten Kategoriengrenzen für die positive-LRK-Bedingung (■), die negative-LRK-Bedingung (■) und die Null-LRK-Bedingung (■). Die Balken zeigen die Standardfehler des Mittelwerts, der Stern (★) den Mittelwert der Stimulusfarbensets. Für Mittelwerte über alle Versuchspersonen wurde das arithmetische Mittel aus allen Einzelwerten (Rohdatenpunkte) pro Bedingung berechnet.

Inferenzstatistische Datenanalyse. Die erhobenen Daten werden analog zu *Experiment II* mit einem gemischten Modell mit kompletter Messwiederholung für wiederholte Beobachtungen, oder geläufiger - Mixed Effects Model for a Replicated, Blocked Design - analysiert (vgl. Pinheiro & Bates, 2000). Hierbei wurden die drei experimentell variierten Bedingungen als fester Faktor behandelt, während die Versuchspersonen als Faktor mit zufälligen Effekten behandelt wurden, um so die unterschiedlichen Varianzquellen adäquat zu modellieren. Dieses Modell wird im Folgenden als einfaches Modell bezeichnet. Ein zweites Modell, das zusätzlich auch die Interaktionen zwischen den Korrelationsbedingungen und den Versuchspersonen modelliert, wird als spezifisches Modell bezeichnet. Das Alpha-Niveau wird a priori auf 0.05 gesetzt. Die Analysen wurden entlang der Empfehlungen von Pinheiro und Bates (2000) mit R (Version 2.14.2) durchgeführt.

Der Vergleich des einfachen mit dem spezifischen Modells zeigt keinen signifikanten Unterschied im Hinblick auf den Goodness-of-Fit ($AIC_{\text{einfach}} = -3735.166$, $AIC_{\text{spezifisch}} = -3733.414$, $p = 0.6188$), weshalb das einfache Modell beibehalten wird, da es weniger Annahmen beinhaltet. Die Hypothesen wurden auf Basis des einfachen Modells getestet. Hierzu wurden umgekehrte Helmert-Kontraste verwendet, um ein Maximum an Information durch den Hypothesentest zu erhalten und gleichzeitig die deskriptive Datenlage zu berücksichtigen. Zwischen der Null-LRK-Bedingung und der negative-LRK-Bedingung konnte kein signifikanter Unterschied gefunden werden ($t_{(374)} = -2.208$, $p = 0.99$). Jedoch zeigt sich ein signifikanter Unterschied zwischen dem Mittel der negative-LRK- und Null-LRK-Bedingung und der positive-LRK-Bedingung ($t_{(374)} = 6.691$, $p < 0.0001$).

3.4.3 Diskussion – Experiment III

Die Ergebnisse stützen nicht die Hypothese, dass sich der wahrgenommene neutrale Punkt in Abhängigkeit von der LRK monoton verändert. Jedoch wird ein klarer partieller Effekt zwischen der positive-LRK-Bedingung im Vergleich zur Kombination der negative-LRK- und Null-LRK-Bedingung deutlich, was die Schlussfolgerung unterstützt, dass die in der Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation enthaltene Information vom visuellen System genutzt wird. Im Rahmen des Beleuchtungsschätzungsansatzes, würde davon ausgegangen werden, dass dieser Hinweisreiz auch bei der temporalen Integration visueller Information vom visuellen System genutzt wird, um eine Beleuchtungsschätzung zu unterstützen.

Das gleiche Ergebnismuster wie in *Experiment III* ist in einem vorhergehenden Experiment (Hirschmueller & Golz, 2011) zu finden, das an dieser Stelle nicht berichtet wurde. Dieses Experiment ist mit *Experiment III* vergleichbar, die Unterschiede liegen in kleineren methodischen Veränderungen wie der Störvariablenkontrolle und

der Stichprobengröße. Dass eine Reproduktion des Experiments zu vergleichbaren Ergebnissen führt, kann als Indikator für die Robustheit der Ergebnisse zumindest innerhalb dieses Untersuchungsparadigmas gewertet werden.

Eine mögliche methodische Erklärung für das vorliegende Ergebnis, wäre das Wirken einer Störgröße. Beispielsweise könnte die Reihenfolge der Stimulusfarben in der Null-LRK-Bedingung oder der negative-LRK-Bedingung einen Beleuchtungswechsel nahegelegt haben. Durch die Anforderungen an die Reihenfolge der Farben im Stimulusfarbense set kann diese Erklärung jedoch ausgeschlossen werden.

Um zu einer Einschätzung über die Größe der Effekte zu gelangen, bietet es sich an, diese mit den bei der räumlichen Integration visueller Information berichteten Effekten zu vergleichen. Als geeignetes Vergleichsexperiment wird Experiment 1 von Golz (2005) gewählt. Die chromatischen Statistiken des von Golz verwendeten Seurathintergrunds und die des in *Experiment III* verwendeten Stimulusfarbense sets, entsprechen sich im Hinblick auf die in Tabelle 3.3 berichteten zentralen Kennwerte weitgehend. Abweichungen liegen nur im Hinblick auf die Standardabweichungen, welche bei Golz nicht erhöht wurden und die mittlere Luminanz vor, welche bei Golz bei 20 cd/m² liegt.

Golz (2005) leitet aus seinen Ergebnissen eine erwartete Veränderung der *I*-Chromatizität in Abhängigkeit von der Korrelation zwischen Luminanz und Rötlichkeit für einen Standardbeobachter ab, indem die Veränderung anhand der Daten aller Versuchspersonen linear geschätzt wurde. Für eine Änderung der Korrelation um 1, also für eine Änderung von der negative-LRK-Bedingung zur Null-LRK-Bedingung oder eine Änderung von der Null-LRK-Bedingung zur positive-LRK-Bedingung beträgt die erwartete Veränderung der *I*-Chromatizität bei Golz $b = 0.00255$. In *Experiment III* ergibt sich zwischen der positive-LRK-Bedingung und der Null-LRK-Bedingung eine Mittelwertsdifferenz von $d = 0.00145$, berechnet auf Basis der personenweise zentrierten Rohdatenpunkte. Damit sind die durch die temporale Integration verursachten Verschiebungen der *I*-Chromatizität nur halb so groß wie in der räumlichen Bedingung.

Betrachtet man die Ergebnisse von Golz' (2005) Versuchspersonen, so zeigt sich, dass alle Versuchspersonen zwischen der Null-LRK-Bedingung und der positive-LRK-Bedingung ($r_{\text{pos}} = 1$) eine Verschiebung des als Grau empfundenen Punktes in Richtung einer höheren *I*-Chromatizität verzeichnen. In dieser Hinsicht stimmen Golz' Ergebnisse und die Ergebnisse in *Experiment III* überein. Betrachtet man nun für jede Versuchsperson den Unterschied zwischen der negative-LRK-Bedingung ($r_{\text{neg}} = -1$) und der Null-LRK-Bedingung, so zeigt sich bei 8 der 11 Teilnehmer in Golz' Experi-

ment, dass dieser Unterschied tendenziell kleiner ist, als der Unterschied zwischen der Null-LRK-Bedingung und der positive-LRK-Bedingung. Aus der Analyse der Ergebnisgrafiken von Golz lässt sich schließen, dass für 3 dieser 8 Versuchspersonen kein signifikanter Anstieg der *I*-Chromatizität von der negative-LRK-Bedingung ($r_{\text{neg}} = -1$) zur Null-LRK-Bedingung zu finden wäre, bei zweien dieser 3 Versuchspersonen liegt zudem die mittlere *I*-Chromatizität deskriptiv über der mittleren *I*-Chromatizität für die Null-LRK-Bedingung. Vergleicht man nun Golz' Ergebnisse mit den Ergebnissen aus *Experiment III* wird erneut deutlich, dass sowohl bei der räumlichen als auch bei der zeitlichen Integration visueller Information ein verringerter Unterschied zwischen der negative-LRK-Bedingung und der Null-LRK-Bedingung im Vergleich zum Unterschied zwischen einer dieser beiden Bedingungen oder dem Mittel dieser beiden Bedingungen und der positive-Korrelations-Bedingung besteht.

Als Grund für den im zeitlichen im Vergleich zum räumlichen Integrationsparadigma deutlich verringerten Unterschied zwischen negative-LRK-Bedingung und Null-LRK-Bedingung kommen zwei Faktoren in Frage. Zum einen könnte die unterschiedliche Meßmethode des neutralen Punktes eine Rolle spielen. So wurde im zeitlichen Integrationsparadigma mit einer adaptiven Doppel-Staircase-Methode gearbeitet, im räumlichen Paradigma mit einer Einstellungsaufgabe. Eine zweite mögliche Erklärung liegt darin, dass in der temporalen Integrationsbedingung die Verschiebungen des als neutral wahrgenommen Punktes insgesamt kleiner zu sein scheinen als in der räumlichen, sodass etwaige Effekte nicht mehr messbar sein könnten. Auf dieses Argument wird in Abschnitt 6.1 eingegangen.

4. Forschungsfrage II – Kann das visuelle System bei der temporalen Informationsintegration flexibel auf grundlegende Veränderungen reagieren?

Dieses Kapitel konzentriert sich auf die Frage, ob das visuelle System bei der zeitlichen Informationsintegration flexibel auf mögliche Situationsveränderungen reagieren kann. Dieser Frage liegt eine Reihe von Überlegungen zu Grunde, die in den Kapiteln 2.4.2 und 2.5.2 ausgeführt werden, und an dieser Stelle kurz zusammengefasst werden sollen.

Beleuchtungsschätzungsansätze (Abschnitt 2.3) gehen davon aus, dass das visuelle System eine Schätzung der Beleuchtung vornimmt, um die im visuellen Input fest verflochtenen Informationen der chromatischen Oberflächen- und Beleuchtungseigenschaften trennen zu können und zu einem farbkonstanten Perzept zu gelangen. Eine Möglichkeit um zu einer solchen Schätzung zu gelangen, ist die Analyse visueller Informationen über die Zeit hinweg (Abschnitt 2.4). Es wird also die an einem Ort der Retina eingetroffene Sequenz von Informationen, sprich der sensorische Input an diesem Ort, analysiert. Diese Analyse einer Reihe zeitlich sequentieller Informationen wird als temporale Integration bezeichnet. Interessant ist nun die Frage, welche Eigenschaften ein solcher temporaler Integrationsprozess hat.

Eine Möglichkeit der temporalen Integration ist die zeitlich fortwährende Integration von begrenzten Mengen neuer Informationen, mathematisch beschreibbar durch die Bildung eines gleitenden Mittels oder eines gewichteten gleitenden Mittels (z. B. Helson, 1943, 1947). Diese Art der Informationsintegration würde zu ständigen Aktualisierungen der Beleuchtungsschätzung führen, die es dem visuellen System erlauben, eine relativ robuste (sofern das Zeitfenster geeignet gewählt wurde) und aktuelle Beleuchtungsschätzung zu generieren. Jedoch würden starke Veränderungen der Beobachtungssituation einige Zeit benötigen, bis sie in die Beleuchtungsschätzung angemessen integriert werden. Daher wäre die Fähigkeit des visuellen Systems auf signifikante Situationsveränderungen zu reagieren, indem es die Auswahl der zur Beleuchtungsschätzung herangezogenen Informationen anpasst von großem Vorteil (der Begriff Anpassung umfasst auch die komplette Neueta-blierung einer Beleuchtungsschätzung) – was im Folgenden als *Reset* bezeichnet wird. Dieser Vorteil, der aus der Fähigkeit des visuellen Systems flexibel auf Hinweise auf eine starke Veränderung der Beobachtungssituation zu reagieren resultieren würde, bleibt erhalten, selbst wenn man die Annahmen zur Gewichtung des Mittelwertes oder die Annahme eines gleitenden Mittelwertes nicht teilt und stattdessen beispielsweise einen einfachen Mit-

telwert bevorzugt. Vielmehr würde die Fähigkeit des visuellen Systems flexibel auf Hinweise auf eine starke Veränderung der Beobachtungssituation zu reagieren, an Bedeutung gewinnen. Auf die Idee, dass das visuelle System in der Lage ist, auf starke Veränderungen der Beobachtungssituation flexibel durch eine Anpassung (bis hin zur neuen Etablierung) zu reagieren, bezieht sich der Begriff *Resetfähigkeit*.

Ob das visuelle System bei der temporalen Integration visueller Information in der Lage ist, diesen temporalen Informationsintegrationsprozess anzupassen und in der Konsequenz die resultierende Beleuchtungsschätzung anzupassen, wenn starke Hinweise auf eine Veränderung der Beobachtungsbedingungen vorliegen, wird in den *Experimenten IV* und *V* untersucht.

Nun stellt sich die Frage, welche Hinweisreize - die im Folgenden auch sprachlich verknappt als *Resetauslöser* bezeichnet werden - das visuelle System nutzen könnte, um flexibel auf signifikante Veränderungen der Beobachtungssituation reagieren zu können. Zwei zentrale Kategorien solcher Hinweisreize lassen sich bilden: monitoring-inhärente Hinweisreize und monitoring-unterbrechende. Monitoring-inhärente Hinweisreize umfassen alle Hinweisreize die in der Umwelt liegen und direkt aus dem visuellen Input extrahiert werden können. Dementsprechend sind diese Auslöser ein Ergebnis externaler Veränderungen, die durch kontinuierliches Monitoring entdeckt werden können. Hierzu zählen Veränderungen der Beleuchtung, die durch Veränderungen der Umweltsituation ausgelöst werden und in einer plötzlich auftretenden großen Chromatizitätsdifferenz des visuellen Inputs münden, beispielsweise die veränderte Beleuchtung durch eine vor die Sonne wandernde Wolke. Monitoring-unterbrechende Hinweisreize umfassen alle Hinweise auf potentielle Beobachtungsveränderungen auf Grund der Handlungen einer Person, beispielsweise starke Kopfbewegungen oder ein längeres Schließen der Augen. Diese Resetauslöser entstehen also durch eine Unterbrechung des Umweltmonitorings. *Experiment IV* untersucht ob monitoring-unterbrechende Auslöser einen Reset der Beleuchtungsschätzung verursachen können, sodass eine neue Beleuchtungsschätzung etabliert wird, *Experiment V* untersucht dies für monitoring-inhärente Auslöser.

Präsentiert man einer Versuchspersonen nacheinander erscheinende Farben als einzige chromatische Information, so wird davon ausgegangen, dass diese temporal integriert werden und zur Beleuchtungsschätzung genutzt werden. Ändert sich nun die Beleuchtung, ohne dass ein Resetauslöser präsentiert wird, wird erwartet, dass der Integrationsprozess die visuelle Information über den Beleuchtungswechsel hinaus integriert. Sind jedoch Resetauslöser vorhanden ist zu erwarten, dass das visuelle System die zeitliche Integration der visuellen Informationen anpasst.

Wenn eine Person nacheinander erscheinende Farben betrachtet, ist innerhalb des Beleuchtungsschätzungsansatzes davon auszugehen, dass ihr visuelles System diese Informationen integriert und zur Beleuchtungsschätzung nutzt. Durch die Beleuchtungsschätzung wird ein Teil der Chromatizität des Inputs der Beleuchtung zugeschrieben. In der Konsequenz verschiebt sich die Chromatizität z. B. eines als grau wahrgenommenen Punktes in Richtung der mittleren Chromatizität der Beleuchtung. Das bedeutet, unter einer rötlichen Beleuchtung wäre die *I*-Chromatizität eines als grau wahrgenommenen Feldes höher, als unter grünlicher Beleuchtung. In den hier durchgeführten Experimenten werden zwei Sets von Stimuli eingesetzt. Diese beiden Sets unterscheiden sich im Hinblick auf ihre mittlere *I*-Chromatizität. Daher wird die Komplexität des Experiments reduziert, indem auf die Messung eines Graupunktes verzichtet wird und stattdessen der Punkt gemessen wird, der als weder Rot noch Grün wahrgenommen wird, also in dieser Hinsicht neutral ist. Dieser Punkt wird als Farbkategoriengrenze bezeichnet.

Vergleicht man die Messung einer Farbkategoriengrenze kurz nach einem Beleuchtungswechsel, wenn kein oder wenn ein Resetauslöser präsentiert wurde, so sollte die Farbkategoriengrenze stärker von der neuen Beleuchtung beeinflusst sein, wenn ein Resetauslöser präsentiert wurde. Daher wird nach der Präsentation eines Resetauslösers Verschiebung der Farbkategoriengrenze in Richtung der neuen Beleuchtung erwartet. Dieser Zeitvorteil in der Anpassung an die neue Beleuchtungssituation ist es, der den Aufwand eines Resets lohnend macht.

4.1 Methoden

In den folgenden Abschnitten werden alle methodischen Informationen, der *Experimente IV* und *V* präsentiert. Im ersten und im vierten Abschnitt werden Informationen präsentiert, die beide Experimente miteinander teilen, in den Abschnitten zwei und drei werden die für die Experimente spezifischen Informationen präsentiert.

4.1.1 Allgemeine Methoden I

Allgemeines Untersuchungsparadigma. Ausgehend von obiger Logik wird als unabhängige Variable die Präsenz eines Resetauslösers während eines Beleuchtungswechsels gewählt. Dessen Wirkung wird durch die Messung einer Farbkategoriengrenze erfasst. Diese abhängige Variable wurde mit Hilfe der Konstanzmethode in Form einer Klassifikationsaufgabe gemessen. Zur Untersuchung der oben genannten Fragestellungen wurde ein oszillierendes Beleuchtungswechselparadigma gewählt. Hierzu wurden zwei feste Stimulusfarbensets mit im Mittel unterschiedlichen *I*-Chromatizitäten verwendet, die in ununterbrochener Sukzession direkt nacheinander präsentiert wurden. Das als Grün bezeichnete Stimulusfarbenset hat eine geringere

mittlere I -Chromatizität, das als Rot bezeichnete eine höhere (vgl. Abbildung 4.1). Eine aufeinanderfolgende Darstellung beider Sets wird im Folgenden als Zyklus bezeichnet. Die Zyklen schließen direkt aneinander an, sodass ein kontinuierliches Pendeln zwischen den beiden maximalen Adaptationspunkten erzeugt wird. Da sich die Stimulusfarbensets im Hinblick auf die mittlere I -Chromatizität unterscheiden, wird die Wirkung dieser unabhängigen Variablen durch die Messung I -Chromatizität der Farbkategoriengrenze von Rot und Grün erfasst. Stimulusfarben und Testfarben wurden als Quadrate (2.7° Sehwinkel) an der gleichen Stelle des Bildschirms präsentiert, während der restliche Bildschirm dunkel war.

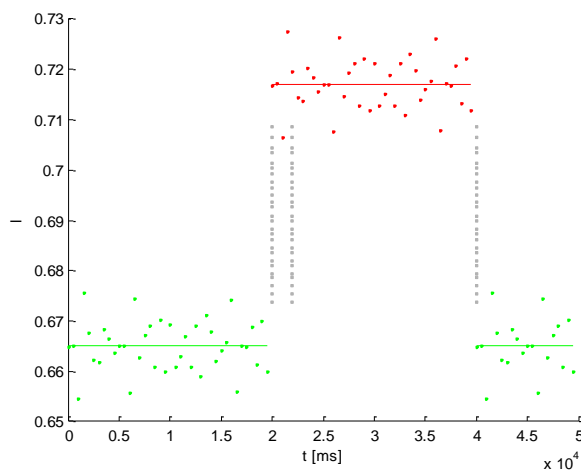


Abbildung 4.1: skizziert das allgemeine Untersuchungsparadigma. Sie zeigt den Ablauf eines Zyklus, sowie den direkten Anschluss des nächsten Zyklus, inklusive des roten (rote Punkte) und grünen (grüne Punkte) Stimulusfarbensets und dessen mittlere I -Chromatizität (rote bzw. grüne Linie). Die grauen Quadrate zeigen die Testfarben (wobei Versuchspersonen spezifische Anpassungen (Abschnitt 4.2, 4.3) nicht berücksichtigt sind), sowie die zeitliche Position der Messungen. Jede Stimulusfarbe wurde für 500 ms präsentiert, jede Testfarbe für 1500 ms (diese Dauer wird in der Abbildung nicht zeitlich berücksichtigt).

Versuchsplan. Um die oben vorgestellte Forschungsfrage zu untersuchen, wurden 5 Bedingungen gestaltet und im Hinblick auf ihre Wirkung auf die Farbkategoriengrenze zwischen Rot und Grün verglichen:

- Die erste Bedingung misst die Grenze zwischen Rot und Grün, nachdem ein Resetauslöser präsentiert wurde. Sie besteht aus einer Messung 2 s nach dem Beleuchtungswechsel von Rot nach Grün. Der Resetauslöser wurde exakt zum Zeitpunkt des Beleuchtungswechsels präsentiert.
- Die zweite Bedingung dient als Kontrollgruppe und misst die Grenze zwischen Rot und Grün 2 s nach dem Beleuchtungswechsel, jedoch ohne dass ein Resetauslöser präsentiert wurde.

- Die dritte Bedingung dient als zeitkompensierte Kontrollgruppe. Sie wurde erstellt um mögliche zeitliche Einflüsse, die durch die Präsentation des Resetauslösers entstehen könnten, zu prüfen.
- Die vierte und fünfte Bedingung dienen als Baseline und helfen, die maximalen Adaptationspunkte der Versuchsperson zu bestimmen und somit die Pendelbewegung der Farbkategoriengrenze innerhalb eines Zyklus aufzuzeigen. Die Messung fand direkt im Anschluss an die Präsentation des gesamten Stimulusfarbensets statt und somit 20 s nach Beginn der Präsentation des Stimulusfarbensets.

Die Details zu jeder der Bedingungen werden im Folgenden erläutert.

4.1.2 Spezifische Operationalisierungen für Experiment IV

Erhebung der Baseline. Die Messung der maximalen Grenzverschiebung in Richtung des präsentierten Stimulusfarbensets, sofern kein Resetauslöser präsentiert wurde, wurde direkt nach der Präsentation des entsprechenden Stimulusfarbensets erhoben. Ziel ist, die Grundfunktionalität des Paradigmas nachzuweisen sowie die Amplitude der Oszillation der Farbkategoriengrenze zwischen dem roten und dem grünen Stimulusfarbenset zu bestimmen.

Untersuchung der Wirkung von Monitoringunterbrechungen auf die Beleuchtungsschätzung. In Experiment IV wird die in Abschnitt 4 vorgestellte Idee, dass das visuelle System monitoring-unterbrechende Resetauslöser nutzen könnte, um die temporale Integration visueller Information anzupassen untersucht. Gemäß der dritten Hypothese wird erwartet, dass wenn man die Messung einer Grenze zwischen zwei Farbkategorien kurz nach einem Beleuchtungswechsel wenn kein oder wenn ein monitoring-inhärenter *Resetauslöser* präsentiert wurde vergleicht, die Farbkategoriengrenze stärker von der neuen Beleuchtung beeinflusst sein sollte, wenn ein monitoring-inhärenter *Resetauslöser* präsentiert wurde. Die Resetauslöser einer solchen Monitoringunterbrechung und ihre Eigenschaften sind spekulativ. Es wird angenommen, dass Aktionen wie Kopfbewegungen, das längeres Schließen der Augen oder lange Dunkelintervalle (Annan & Gilchrist, 2004) als Auslösereiz fungieren könnten. In diesem Experiment wird der monitoring-unterbrechende Resetauslöser als Bewegung zu einem anderen Raum operationalisiert. Das beinhaltet eine Kopfbewegung und die Präsentation von Stimuli in einer neuen räumlichen Position, die von der alten physikalisch getrennt ist. Hierzu wurde ein Reflektanztunnel mit einer Trennwand in der Mitte versehen, der von zwei Gucklöchern abgeschlossen wurde (Abbildung 4.2). Das Innere des Reflektanztunnels wurde komplett mit Moosgummi ausgekleidet, um Reflexionen zu vermeiden.

Experimentalbedingung. Die Experimentalbedingung wird für *Experiment IV* wie folgt operationalisiert. Die Resetfähigkeit wird am Beispiel des Beleuchtungswechsels von einer grünlichen zu einer rötlichen Beleuchtung untersucht. Hierzu wird nach Abschluss der Betrachtung des gesamten Stimulusfarbensets der grünen Bedingung ein Hinweis zum Wechsel des Raums gegeben. Da die Stimulusfarben direkt nacheinander präsentiert werden wurde die Versuchsperson instruiert, sobald der Bildschirm schwarz wird, das Guckloch zu wechseln. Hierzu wurde ein Zeitfenster von 2000 ms geplant. Dann begann die Darstellung der ersten vier Farben (je 500 ms) des roten Stimulusfarbensets, nach 2 s wurde die Testfarbe präsentiert, die kategorisiert werden musste. Anschließend wurden die restlichen Farben des Stimulusfarbensets präsentiert, um die Präsentationszeit des Stimulusfarbensets konstant zu halten. Nur vor dem Wechsel vom grünen Stimulusfarbense zum roten wurde ein Wechsel des Beobachtungsraums vorgegeben. Daher werden in beiden Räumen beide Stimulusfarbensets präsentiert, sodass die, über die Verbleibedauer in einem Raum gemittelte Chromatizität des Testfeldes, in beiden Räumen gleich war. Zudem wechselt die Messung der Farbkategoriengrenze zwischen den Räumen hin und her.

Kontrollbedingung. In der Kontrollbedingung wurde die Farbkategoriengrenze 2 s nach dem Wechsel vom grünen Stimulusfarbense zum roten Stimulusfarbense ohne die Präsentation eines Hinweisreizes – sprich ohne Raumwechsel – erhoben. Die Erhebung der 30 Wiederholungen des Testfarbensets wurde zur Hälfte im linken zur anderen Hälfte im rechten Raum durchgeführt.

Zeitkompensierte Kontrollbedingung. Eine denkbare Alternativerklärung für einen etwaigen Effekt zwischen Experimentalbedingung und Kontrollbedingung wäre, dass die temporale Integration in den 2000 ms, in denen der Wechsel des Raumes stattfindet, voranschreitet und sich dabei von der induzierten grünen Beleuchtung hin zu einer neutraleren bewegt. Um zwischen beiden möglichen Erklärungen für einen Effekt unterscheiden zu können, muss diese Konfundierung der „Handlung des Raumwechselns“ und der „zeitlichen Lücke“ zwischen der Präsentation des Stimulusfarbensets gelöst werden. Hierzu wird eine zeitkompensierte Kontrollbedingung eingeführt. In der zeitkompensierten Kontrollbedingung wird nach der Präsentation des grünen Stimulusfarbensets für die Dauer von 2000 ms der individuelle Graupunkt präsentiert und somit der Präsentation des roten Stimulusfarbensets vorangestellt.

Die Messung des individuellen Graupunktes erfolgte in einer ausschließlich hierfür vorgesehenen Sitzung, in der die Versuchspersonen zehn Einstellungen des Graupunktes vornahmen. Hierzu diente eine Einstellaufgabe, bei der die Versuchspersonen die Möglichkeit hatten, die I -Werte frei einzustellen, während der s -Wert und

die Luminanz auf die Werte des Testfarbensets fixiert waren. Die aus den zwölf Durchgängen gemittelten I -Werte, kombiniert mit dem fixierten s -Wert und der Luminanz des Testfarbensets wurden für zwei Sekunden der Versuchsperson präsentiert, um einen im Hinblick auf die rot-grün Kategorialität neutralen Reiz zu präsentieren.

Für Experimentalbedingung, die Kontrollbedingung sowie die zeitkompensierte Kontrollbedingung wurde das Testfarbenset jeweils 30 Mal erhoben. Für die beiden Baselinebedingungen jeweils 20 Mal.

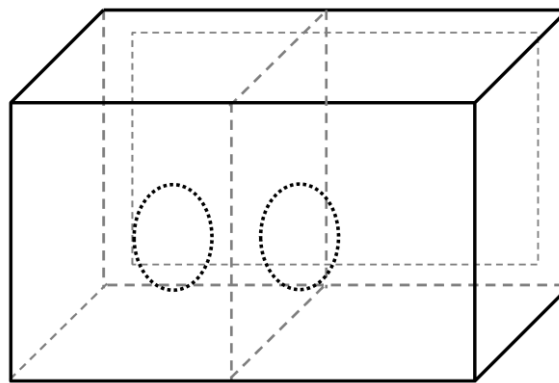


Abbildung 4.2: Skizze des Versuchsaufbaus.

4.1.3 Spezifische Operationalisierungen für Experiment V

Erhebung der Baseline. Die Messung der maximalen Verschiebung der Farbkategoriengrenze in Richtung des präsentierten Stimulusfarbensets, sofern kein Resetauslöser präsentiert wurde, wurde direkt nach der Präsentation des entsprechenden Stimulusfarbensets erhoben. Ziel ist, die Grundfunktionalität des Paradigmas nachzuweisen sowie die Amplitude der Oszillation der Farbkategoriengrenze zwischen dem roten und dem grünen Stimulusfarbenset zu bestimmen.

Untersuchung der Wirkung von monitoring-inhärenten Veränderungshinweisen auf die Beleuchtungsschätzung. *Experiment V* untersucht, ob das visuelle System monitoring-inhärente und somit umweltbasierte Hinweisreize für einen Reset der temporalen Informationsintegration mit dem Ziel der Beleuchtungsschätzung nutzt. Ein möglicher monitoring-inhärenter Hinweisreiz der hier untersucht werden soll, ist eine plötzliche und großflächige Veränderung des sensorischen Inputs, wie sie beispielsweise durch eine Beleuchtungsveränderung in der Umwelt entstehen könnte. Operationalisiert wird diese großflächige Änderung des sensorischen Inputs durch ein Aufleuchten des gesamten Bildschirms. Diese Operationalisierung wird, zur Kontrolle des Einflusses der Chromatizität des aufleuchtenden monitoring-inhärenten Hinweisreizes, in zwei Varianten ausgeführt, zum einen durch ein rotes Aufleuchten (höhere I -

Chromatizität), zum anderen durch ein grünes Aufleuchten (geringere I -Chromatizität), da jedes Aufleuchten, sollte es einfach als eine weitere Information in die Beleuchtungsschätzung integriert werden, den chromatischen Mittelwert der Stimuli beeinflusst. Es wird erwartet, dass sich ein Effekt des Aufleuchtens für beide Experimentalbedingungen ergibt und damit Farbkategoriengrenze zwischen Rot und Grün weiter in Richtung des chromatischen Mittelwertes des roten Stimulusfarbensets verschoben ist als in der Kontrollbedingung.

Die Anzeigedauer für das Aufleuchten wurde auf 250 ms festgelegt, sodass dieser trotz eines eventuellen Blinzeln, das in der Regel 100-150 ms dauert (Burr, 2005) wahrgenommen werden kann. Das rote Aufleuchten des Bildschirms ($I=0.717$, $s=1.1466$, $Luminanz=10.625$) und das grüne Aufleuchten ($I=0.665$, $s=1.1466$, $Luminanz=10.625$) des Bildschirms entspricht in den I - und s -Werten den Mittelwerten der Stimulusfarbensets, jedoch wurde die Luminanz ($Luminanz_{Stimulusfarbensets}=85$) aufgrund der Erfahrungen in Vorexperimenten deutlich verringert, um zu verhindern, dass sich die Versuchspersonen durch das Aufleuchten geblendet fühlen. Damit setzte sich ein Zyklus in der Experimentalbedingung folgendermaßen zusammen: zunächst wurden die Stimulusfarben des grünen Stimulusfarbensets zeitlich sukzessiv präsentiert, darauf folgte die Präsentation eines monitoring-inhärenten Hinweisreizes - also eines roten oder grünen Aufleuchtens, gefolgt von der Präsentation von vier Stimuli (je 500 ms) des roten Stimulusfarbensets, der Messung mittels einer Farbe des Testfarbensets und der anschließenden Präsentation der restlichen Farben des roten Stimulusfarbensets.

Kontrollbedingung. Die einfache Kontrollbedingung unterschied sich von der Experimentalbedingung nur dahingehend, dass der monitoring-inhärente Hinweisreiz weggelassen wurde.

Zeitkompensierte Kontrollbedingung. Zum anderen wurde eine zeitkompensierte Kontrollbedingung eingeführt. Hierzu wurde zwischen der Präsentation der beiden Stimulusfarbensets für 250 ms der Mittelwert des roten Stimulusfarbensets als zusätzliche Stimulusfarbe präsentiert. Die Wahl des chromatischen Mittelwertes des roten Stimulusfarbensets ist eine konservative Vorgehensweise, da die Experimentalgruppe nun mit einer zeitkompensierten Kontrollgruppe verglichen wird, deren Präsentationsdauer des roten Stimulusfarbensets um 250 ms „verlängert“ wurde.

Für vier Bedingungen, nämlich die beiden Experimentalbedingungen, die Kontrollbedingung sowie die zeitkompensierte Kontrollbedingung wurde das Testfarbenset jeweils 30 Mal erhoben. Für die beiden Baselinebedingungen jeweils 20 Mal.

4.1.4 Allgemeine Methoden II

Alle hier vorgestellten Informationen gelten für beide Experimente, wenn nicht anders vermerkt.

Stimulusfarbenset. Als Stimulusfarbenset wird ein Set aus zufällig ausgewählten Farbwerten gewählt, die gemeinsam verschiedene Verteilungseigenschaften erfüllen. Ziel dieses Stimulusfarbensets ist es, durch seine Eigenschaften die Interpretation einer bestimmten Beleuchtung zu induzieren. Im vorliegenden Paradigma werden zwei unterschiedliche Stimulusfarbensets verwendet, eines das auf eine rötliche Beleuchtung hindeuten soll und eines, das auf eine grünliche Beleuchtung hindeuten soll. Es wird angenommen, dass die Präsentation eines Stimulusfarbensets zu einer Verschiebung der Farbkategoriengrenze zwischen Rot und Grün in Richtung des Mittelwerts des jeweiligen Stimulusfarbensets führt. Die beiden Sets werden sequentiell dargeboten, um so eine kontinuierliche Oszillation zwischen den beiden Verschiebungen der Farbkategoriengrenze in Richtung des Mittelwerts des jeweiligen Stimulusfarbensets zu erreichen.

In Vorexperimenten wurden drei Eigenschaften der Stimulusfarbensets untersucht, um deren Einfluss auf die Verschiebung der Grenze zwischen zwei Farbkategorien festzustellen. Diese sind die Präsentationsdauer (Anhang B.1), der Mittelwert (Anhang B.2, Anhang B.3) und die Variabilität (Anhang B.4) des gesamten Stimulusfarbensets. Ziel dieser Vorexperimente war, die Präsentationsdauer des gesamten Stimulusfarbensets soweit wie möglich zu reduzieren, dabei jedoch eine ausreichende Differenz zwischen den Messungen der Farbkategoriengrenze im Anschluss an die Darbietung des grünen Stimulusfarbensets und im Anschluss an die Darbietung des roten Stimulusfarbensets zu erhalten.

Die Präsentationsdauer des gesamten Stimulusfarbensets hat zentralen Einfluss auf das Experimentaldesign, denn mit zunehmender Präsentationsdauer eines Stimulusfarbensets approximiert die Farbkategoriengrenze stärker den Mittelwert des präsentierten Stimulusfarbensets. Dieser klassische Effekt ist häufig in der Literatur zu finden (vgl. Abschnitt 2.4) jedoch lässt sich hieraus nur die Effektrichtung, nicht jedoch die Ausprägung der durch den Reset verursachten Verschiebung ableiten. Durch lange Readapatationsintervalle wird sichergestellt, dass ausreichend ähnliche Adaptationsniveaus zwischen den Zyklen erreicht werden und in Konsequenz die Vergleichbarkeit zwischen den Experimentalbedingungen gesichert wird. Andererseits sollten die Intervalle so kurz wie möglich gehalten werden, da die Gesamtdauer des Experiments insbesondere von diesem Faktor abhängt. Die Dauer eines Intervalls wurde durch Vorexperimente sorgfältig bestimmt (Anhang B.1) und auf 20 s pro Stimulusfarbenset gelegt.

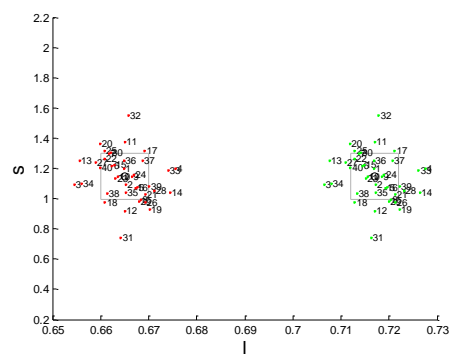
Die Auswirkungen der *chromatischen Mittelwerte* der gewählten Stimulusfarbensets sind sowohl in der Steigung des Approximationsverlaufs zwischen den beiden Adaptationsmaxima sowie in deren Ausprägung ersichtlich (Anhang B.2, Anhang B.3). So führen extremere Mittelwerte zu steileren Adaptationsverläufen und extremeren Adaptationsmaxima. Daher wird mit im Vergleich zu den *Experimenten I-III* extremeren aber noch immer moderaten Mittelwerten für die Stimulusfarbensets gearbeitet, auch um ein Überdecken des Reseteffekts durch zu steile Adaptationsprozesse zu vermeiden. Die Mittelwerte der Stimulusfarbensets wurden analog zu *Vorexperiment IV* festgelegt (Rot: $M_I = 0.717$, $M_S = 1.1466$, $M_{Luminanz} = 85$; Grün: $M_I = 0.665$, $M_S = 1.1466$, $M_{Luminanz} = 85$).

Die *Variabilität* eines Stimulusfarbensets beschreibt die Anzahl unterschiedlicher Stimulusfarben im Set. Auch wenn die Ergebnisse in *Vorexperiment IV* (Anhang B.4) auf die Einsatzmöglichkeit weniger Stimulusfarben hinweist, wird hier die Anzahl dargestellter Farben auf 40 Farben pro Stimulusfarbenset gelegt.

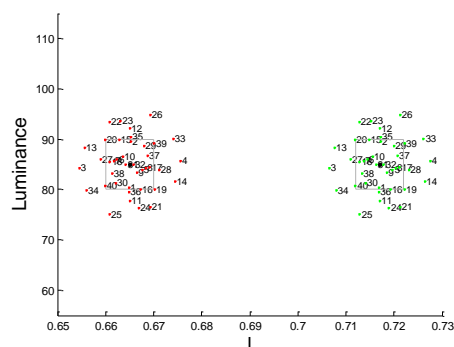
Für die *Experimente IV und V* wurden zwei Stimulusfarbensets ausgewählt, wobei die Konstruktions- und Auswahlkriterien, abgesehen vom Mittelwert der Stimulusfarbenverteilung auf der *I*-Achse, für beide Sets identisch waren. Die Mittelwerte der Stimulusfarbensets wurden analog zu *Vorexperiment IV* festgelegt (Rot: $M_I = 0.717$, $M_S = 1.1466$, $M_{Luminanz} = 85$; Grün: $M_I = 0.665$, $M_S = 1.1466$, $M_{Luminanz} = 85$). Die Präsentationsdauer eines Stimulusfarbensets wurde auf 20s festgesetzt, die Anzahl der Stimulusfarben auf 40 pro Set. Um ein solches Stimulusfarbenset zu erstellen, wurden 20 Farbwerte zufällig gezogen und auf allen drei Ebenen am Mittelwert des Stimulusfarbensets punktgespiegelt. Die Werte werden so angeordnet, dass jeder Originalwert von seinem punktgespiegelten Doppel direkt gefolgt wird. Somit ist sichergestellt, dass nach jeder zweiten gezeigten Farbe, der Mittelwert der gezeigten Farben dem des gezeigten Stimulusfarbensets entspricht und somit der Mittelwert als bester Prädiktor fungiert. Diese Ziehung wurde für jedes Stimulusfarbenset 250 Mal wiederholt und daraus die am besten zu den Kriterien passende Stimulusfarbensets ausgewählt. Unter diesen Stimulusfarbensets hatte jedes Set ein korrespondierendes Set in der anderen Stimulusfarbenbedingung. Es wurde das Paar ausgewählt, das die folgenden Auswahlkriterien am besten erfüllte. Beide Stimulusfarbensets unterschieden sich lediglich im Hinblick auf den mittleren *I*-Wert im MLB-Farbraum und teilen alle weiteren Verteilungsparameter (Tabelle 4.1). Des Weiteren wurde darauf geachtet, dass sich die Werte möglichst auf jeder Achse normalverteilen. Schließlich wurde darauf geachtet, dass das Set weder große Ausreißer noch große freie Flächen in der in den verschiedenen Ebenen im MLB-Farbraum aufwies. Zudem sollten die angestrebten Standardabweichungen und Korrelationen so exakt wie möglich erreicht werden.

Tabelle 4.1: Eigenschaften der Stimulusfarbensets für *Experiment IV* und *V*.

Mittlere l -Chromatizität	<i>Rot</i>	<i>Grün</i>
	0.717	0.665
Mittlere s -Chromatizität	1.1466	
Mittlere <i>Luminanz</i>	85	
$SD(l)$	0.005 (realisiert 0.0049)	
$SD(s)$	0.1536 (realisiert 0.1516)	
$SD(Luminanz)$	5 (realisiert 4.9355)	
Korrelation $r(l, Luminanz)$	0	
Korrelation $r(s, Luminanz)$	-0.1153	
Korrelation $r(l, s)$	-0.2133	

(l, s)-Diagramm

rotes (rote Punkte) und grünes (grüne Punkte) Stimulusfarbenset im (l, s) -Diagramm. Die Zahlen geben die Präsentationsposition im Stimulusfarbenset an, die Kästen markieren $\pm 1 SD$.

(l, Luminanz)-Diagramm

rotes (rote Punkte) und grünes (grüne Punkte) Stimulusfarbenset im $(l, Luminanz)$ -Diagramm. Die Zahlen geben die Präsentationsposition im Stimulusfarbenset an, die Kästen markieren $\pm 1 SD$.

Testfarbenset. Um die Farbkategoriengrenze zwischen rot und grün mit der Konstanzmethode zu messen, wurde vorab ein festes Testfarbenset gebildet. Dieses Set muss im Hinblick auf den Versuchsaufbau bestimmte Eigenschaften haben. Vorab ist die individuelle Lage der Farbkategoriengrenze zwischen rot und grün bei einem bestimmten perzeptuellen Zustand nicht bekannt. Zudem kann die Lage der Farbkategoriengrenze sich zwischen den Versuchspersonen stark unterscheiden. Zudem gibt es interindividuelle Unterschiede über den Ausprägungsgrad der Grenzverschiebung (vgl. *Vorexperiment I*, Anhang B.1). Zudem gibt es kein Wissen über die Lokalisation der Grenze in einem bestimmten perzeptuellen Zustand und über die Veränderung dieser Lokalisation kurz nach einem Beleuchtungswechsel, insbesondere in den neuen Experimentalbedingungen. Daher wird ein breit gestreutes Testfarbenset verwendet, welches zur Messung der Farbkategoriengrenze zwischen Rot und Grün in allen fünf Bedingungen verwendet wird. Ein weiterer Vorteil dieser Lösung ist, dass der Einfluss des Testfarbensets über alle Bedingungen hinweg konstant bleibt. Somit ist der einzige Unterschied zwischen allen Messzeitpunkten der Zeitpunkt an dem der perzeptuelle Zustand gemessen wird. Ein weiterer Vorteil eines breit angelegten Testfarbensets ist, dass es mit großer Wahrscheinlichkeit die für die Messung relevanten Bereiche überlappt. Jedoch darf nicht vergessen werden, dass das Netz an Testfarben relativ eng sein muss, damit das Testfarbenset auch sensitiv für kleine Veränderungen bleibt.

In der Praxis wurde eine parallel zur I -Achse verlaufende Teststrecke (mit fixierten s - und *Luminanzwerten*) zwischen den I -Werten der chromatischen Mittelwerte der beiden Stimulusfarbensets in den MLB-Farbraum gelegt. Dann wurden alle verschiedenen darstellbaren Farben auf dieser Teststrecke ermittelt. Diese Prozedur vermeidet, dass sich unter den 84 gefundenen Farben, zwei Testfarben mit unterschiedlichen MacLeod-Boynton Werten aber den gleichen RGB-Werten befinden und ins Testfarbenset aufgenommen werden. Hierbei ist zu bedenken, dass die Distanzen zwischen den einzelnen Farbwerten nicht gleich sind. Danach wurde die Teststrecke in acht Teilstücke gleicher Größe unterteilt. Die Intervalle wurden in aufsteigender Ordnung durchnummeriert, beginnend bei $I = 0.665$. Wenn man die Ergebnisse der ersten zweiten und vierten Vorstudie auf die Liniensegmente projiziert, wird deutlich, dass keiner der gemessenen Grenzen zwischen Rot und Grün im ersten oder im achten Intervall liegen. Daher wurden die folgende Auswahl gemacht: Aus den Intervallen 1 und 8 wurden keine Testfarben ausgewählt. Aus den Intervallen 2 und 7 wurde jede dritte Farbe ausgewählt. Aus den Intervallen 3 bis 6 wurde jede zweite Farbe ausgewählt (Anhang B.5). Um die Anzahl der ausgewählten Testfarben den Intervallen 2 und 7 zu erhalten, wurde die erste Farbe des zweiten Intervalls, nicht in das Testfarbenset eingeschlossen. Das so entstandene Set besteht aus 26 Testfarben, wobei es in der Mitte eine größere Dichte an Testfarben hat als in den äußeren Bereichen. Dieses

Testfarbenseit wurde den Teilnehmern beider Experimente präsentiert. Nach vier vollständigen Messungen wurden die Daten jedes Teilnehmers analysiert, um zu prüfen, ob das Testfarbenseit richtig positioniert war. In diese Analyse gingen die Messzeitpunkte der beiden Baselinebedingungen sowie die der (einfachen) Kontrollbedingung (vgl. Abschnitt 4.1.1) ein, also jeweils eine Messung am Ende der Präsentation des roten oder des grünen Stimulusfarbenseits und die Messung zwei Sekunden nach dem Wechsel von Stimulusfarbenseit Grün zu Rot. Die Untersuchung dieser drei Bedingungen ermöglicht es, die gesamte Grenzverschiebung abzuschätzen. Zudem wurde kontrolliert, ob in der Kontrollbedingung, die 2s nach dem Wechsel vom grünen Stimulusfarbenseit zum roten Stimulusfarbenseit erhoben wird, die Häufigkeitsfunktion und ihre angefittete psychometrische Funktion vollständig im Bereich um die geschätzten Schwellen abgebildet werden und diese im Bereich der nahe beieinanderliegenden Testfarben (Intervalle 3 bis 6) liegt. Ergaben sich aus diesem Kontroll- und Zuschneideprozess Änderungen am Testfarbenseit, wurden geschnittene Testfarben komplett aus der Auswertung ausgeschlossen, neu hinzugenommene Farben weiterhin 20 bzw. 30 mal erhoben, was für die Teilnehmer die Bearbeitung zusätzlicher Durchgänge erforderte. Details über diese Kontroll- und Zuschneideprozesse werden für die jeweiligen Teilnehmer in den Ergebnisteilen gemeinsam mit den konkreten Daten berichtet (Abschnitte 4.2, 4.3).

Blockweise Erhebung. In beiden Experimenten wurde die Erhebung der Bedingungen blockweise ausgeführt. Dadurch sollten Verwirrungen bezüglich der zu bearbeitenden Aufgabe in *Experiment IV* und Übertragungen von Hypothesen und Erwartungen auf die Kontrollbedingungen entgegengewirkt werden. Im ersten Block wurde die Kontrollbedingung sowie die beiden Baselines der maximalen Rot- und Grünintegration erhoben. Innerhalb dieses Blocks wurde die Erhebung der 20 Wiederholungen der beiden Baselines und der 30 Wiederholungen des Testfarbenseits der Kontrollbedingung so gemischt, dass in einer Sitzung mindestens eine Messung des Testfarbenseits einer der Baseline-Bedingungen und eine Messung des Testfarbenseits der Kontrollbedingung enthalten war. Zudem wurde die Erhebung der Versuchsbedingungen über die Sitzungen balanciert, um eventuelle Übungseffekte zu kompensieren.

Im zweiten Block wurde in *Experiment IV* die Experimentalbedingung des Raumwechsels erhoben. Um Alternativerklärungen auszuschließen wurde hier die Verdunklung des Experimentalraums perfektioniert. In *Experiment V* wurden die beiden Experimentalbedingungen des roten und grünen Aufleuchtens untersucht, wobei in jeder Sitzung beide Bedingungen vertreten und in zufälliger Reihenfolge erhoben wurden.

Im dritten Block wurde in beiden Experimenten jeweils die zeitkompensierte Kontrollbedingung erhoben. War nach einer ersten Ergebnisanalyse nach Abschluss des zweiten Blocks kein Hinweis auf einen Effekt der Manipulation in der Experimentalbedingung zu erkennen, wurde bei dieser Versuchsperson auf die Erhebung der zeitkompensierten Kontrollbedingung verzichtet.

In *Experiment IV* wurde zur Erhebung des ersten Blocks mit 23 Sitzungen geplant, zur Erhebung des zweiten Blocks mit 10 Sitzungen und zur Erhebung des dritten Blocks mit 10 Sitzungen. In *Experiment V* wurde mit 23 Sitzungen zur Erhebung des ersten Blocks gerechnet, mit 20 zur Erhebung des zweiten und mit 10 zur Erhebung des dritten Blocks. Wenn am Testfarbensenst mehrere Anpassungen vorgenommen werden mussten, wurde eine zusätzliche Sitzung eingefügt.

Versuchsablauf und Aufgabe. Innerhalb eines Zyklus wurde jede Stimulusfarbe für 500 ms sowie eine Testfarbe für 1500 ms präsentiert, womit die maximale Antwortzeit ebenfalls bei 1500 ms lag. Die Teilnehmer bearbeiteten für jede Testfarbe eine Klassifikationsaufgabe, indem sie entschieden, ob die „gemeinsam mit einem Ton präsentierte Farbe Rot oder Grün“ ist. Sechs bis sieben Zyklen mit Messungen der gleichen Bedingung und damit immer an der gleichen Position im Zyklus, wurden zu einem Durchgang zusammengefügt. So wurde sichergestellt, dass der Versuchsperson zwischen jeder Messung alle Stimulusfarben einmal präsentiert wurden. Die in einem Durchgang auftretenden Farben eines Testfarbensets wurden für jede Wiederholung zufällig den Durchgängen zugeteilt. Der ersten Messung jedes Durchgangs wurde ein Zyklus ohne Messung vorangestellt. Lies eine Versuchsperson die Klassifikation einer Testfarbe aus, wurde diese im Anschluss wiederholt.

Eine Sitzung lief immer nach dem gleichen Schema ab. Zunächst erfolgte eine Dunkelgewöhnungsphase von fünf Minuten, gefolgt von einer sorgfältigen mündlichen Instruktion des Teilnehmers. Anschließend folgte die Bearbeitung von im Regelfall zwölf Durchgängen, wobei die Teilnehmer in Einzelsitzungen arbeiteten. Zwischen den Durchgängen hatten die Teilnehmer die Möglichkeit, nach Bedarf Pausen zu machen. Nach dem Beenden der Bearbeitung folgte ein kurzes Interview zum Verlauf der Sitzung. In den ersten vier Sitzungen wurde jeweils eine Messung des gesamten Testfarbensets für die Baseline-Bedingungen und die Kontrollbedingung erhoben, um die notwendigen Daten für die Angemessenheitsprüfung des Testfarbensets zu ermitteln. In den ersten drei Sitzungen des ersten Blocks wurde jeweils ein Übungsdurchgang der Bearbeitung vorangestellt, in der ersten Sitzung des zweiten Blocks wurden zwei Übungsdurchgänge vorangestellt, um Schwierigkeiten im Umgang mit der Experimentalbedingung – wie Zeitproblemen beim Wechsel zwischen den Räumen oder

Blendungen durch das rote oder grüne Leuchten – sofort zu erkennen. Der Erhebung der zeitkompensierenden Kontrollbedingung wurde in *Experiment IV* kein Übungsdurchgang vorangestellt, in *Experiment V* einer.

Teilnehmer. An *Experiment IV* nahmen zwei Versuchspersonen (1 männlich, 1 weiblich) im Alter von 23 Jahren teil. An *Experiment V* nahmen 3 Teilnehmerinnen im Alter von 21, 29 und 32 Jahren teil. Alle Teilnehmer hatten normale bzw. zu normal korrigierte Sehschärfe und zeigten keine Auffälligkeiten im *Ishihara Test for Colour Blindness* (Ishihara, 1967). Zudem hatten sie nach Selbstauskunft keine, die Teilnahme am Experiment ausschließenden gesundheitlichen Beeinträchtigungen. Für die Teilnahme am Experiment wurden die Versuchspersonen mit 9 Euro pro Stunde vergütet.

Anfitten der psychometrischen Funktionen. Da beide Experimente die Konstanzmethode verwenden, dient das Anfitten psychometrischer Funktionen als zentrale Auswertungsmethode. Das bedeutet, dass für jede Bedingung eine psychometrische Funktion an die erhobenen Daten angepasst wurde. Eine psychometrische Funktion ist eine sigmoide Funktion die durch ihre Schwelle (Threshold), ihre Steigung, einen Rateparameter und einen Fehlerparameter beschrieben werden kann. Die Schwellen der psychometrischen Funktionen repräsentieren jeweils die Schätzung der Grenze zwischen Rot und Grün unter der entsprechenden Darstellungsbedingung. Das verwendete Experimentaldesign wird als one-alternative forced-choice Aufgabe, bei der der Rateanteil und der Fehleranteil (Verpasser) auf 0 gesetzt werden, modelliert. In dieser Konfiguration liegt die Schwelle bei 0.5. Zum Anfitten wird die Palamedes Toolbox (Prins & Kingdom, 2012) für MATLAB (The MathWorks Inc., 2009) verwendet.

4.2 Ergebnisse – Experiment IV

Prüfung der Angemessenheit des Testfarbensets anhand der in Abschnitt 4.1.4 beschriebenen Kriterien. Für Versuchsperson 1 zeigt sich deutlich, dass die grüne Baseline keinen Punkt innerhalb des Testfarbensets erreicht, der immer eindeutig als grün klassifiziert wird (Anhang B.6). Daher wird dem Testfarbenset für Versuchsperson 1 eine zusätzliche 27. Testfarbe hinzugefügt, die im ersten Intervall der Teststrecke liegt, um den Verlauf der grünen Baseline deutlich zeichnen zu können (vgl. Anhang B.6). Die Prüfung der Angemessenheit des Testfarbensets für Versuchsperson 2 (Anhang B.6) ergab, dass dieses so beibehalten werden konnte.

Ergebnisse. Mittels psychometrischer Funktionen wurden für jede Bedingung die Anteile der Durchgänge, in denen eine Testfarbe als rot klassifiziert wurde, in Relation zur Rötlichkeit der Testfarbe gesetzt. Die angepassten psychometrischen Funktio-

nen haben die Form logistischer Funktionen (Gleichung 4.1), wobei die Schwelle (α), als Operationalisierung der gemessenen Grenze zwischen zwei Farben, bei 0.5 liegt und ihr I -Wert als freier Parameter geschätzt wird. Da die Schwelle in diesem Fall die maximale Unsicherheit bei der Klassifikation als zu einer Farbkategorie gehörend ausdrückt, wird sie als Punkt subjektiver Gleichheit bezeichnet. Die Steigung (β) der Funktion am Punkt subjektiver Gleichheit wird ebenfalls frei geschätzt, während der Rateparameter (γ) – auf Grund der inhaltlichen Überlegung, dass es im Klassifikationsparadigma keine falschen Antworten gibt und die Versuchspersonen in Bezug auf das Raten zudem ausführlich instruiert wurden – sowie die Anteile der Verpasser (λ) auf 0 fixiert werden. Die Schätzer für die freien Parameter ($\hat{\alpha}, \hat{\beta}$) werden mit Hilfe einer Maximum-Likelihoodprozedur ermittelt. Die Goodness-of-Fit Tests für die angefitzten Funktionen ergaben Hinweise auf unzureichende Fits, weshalb im ersten Schritt das Fixieren der Verpasserrate (λ) aufgehoben wird. Inhaltlich geht das Fixieren des Parameters (λ) auf 0 mit der Festlegung einher, dass sich die Versuchsperson niemals vertippt, was wie Wichmann und Hill (2001) diskutieren kein realistisches Szenario für psychophysikalische Experimente mit vielen Wiederholungen darstellt und deshalb für ein Intervall zwischen [0 0.06] plädieren, innerhalb dessen die Verpasserrate frei angefitzt werden kann. Die von Wichmann und Hill empfohlene Intervallobergrenze passt ebenfalls zu den relativen Häufigkeiten der von den Teilnehmern berichteten Fehlerzahlen, die nach jeder Sitzung abgefragt wurden (*rhunkorrigierter falscher Eingaben*, $VP1 = 0.017$, *rhunkorrigierter falscher Eingaben*, $VP2 = 0.024$). Die angepassten Funktionen zeigen, dass der Parameter (λ) für die Experimental- und Kontrollbedingungen beider Versuchspersonen jeweils auf 0 geschätzt wird, weshalb das einfachere Ausgangsmodell mit fixierter Verpasserrate beibehalten wird, auch wenn für die Baselinebedingungen Werte > 0 geschätzt wurden.

$$F_L(x; \alpha, \beta) = \frac{1}{1 + \exp(-\beta(x - \alpha))} \quad 4.1$$

$$\text{mit } x \in (-\infty, +\infty), \alpha \in (-\infty, +\infty), \beta \in (0, +\infty)$$

In den Kontroll- und Experimentalbedingungen wurden für die Schätzer von Schwelle und Steigung zusätzlich die Standardfehler mit Hilfe einer parametrischen Bootstrapprozedur bestimmt und anschließend Konfidenzintervalle (Kingdom & Prins, 2010) zur inferenzstatistischen Einordnung der Ergebnisse berechnet (Abbildung 4.3, Abbildung 4.4 und Abbildung 4.5).

Überblick. Lage und Breite des Oszillationsbereichs variieren zwischen beiden Versuchspersonen stark (Abbildung 4.3). Ebenso weichen die Steigungen der an die Baselinebedingungen angepassten psychometrischen Funktionen stark von den, für die

Kontroll- und Experimentalbedingungen ermittelten Steigungen ab. Dies legt den Verdacht nahe, dass starke Übungseffekte in den Daten vorhanden sind. Dies wurde exemplarisch bei Versuchsperson 1 durch eine Aufteilung der erhobenen Daten in drei zeitliche Blöcke für die Kontrollbedingung und Experimentalbedingung untersucht. Deskriptiv zeigen sich hier Unterschiede zwischen den Gruppen (vgl. Anhang B.8a, b), jedoch ist keine systematische Verschiebung des Mittelwertes mit zunehmender Übung zu erkennen.

Neutraler Punkt. Die Ergebnisse zeigen für beide Versuchspersonen deskriptiv den gleichen Effekt, auch wenn die Ausprägung sehr unterschiedlich ist. So zeigt sich in der Experimentalbedingung eine klare Verschiebung der geschätzten Schwelle zwischen Rot und Grün hin zu einem rötlicheren Wert im Vergleich zu den Kontrollbedingungen. Hierbei ist der größte Unterschied jeweils zwischen der Experimentalbedingung und der zeitkompensierten Kontrollbedingung zu finden (Abbildung 4.3, Anhang B.9). Eine genaue Betrachtung der 95%-Konfidenzintervalle weist zudem darauf hin, dass die Unterschiede zwischen der Kontrollbedingung und der Experimentalbedingung sowie zwischen der zeitkompensierten Kontrollbedingung und der Experimentalbedingung für beide Versuchspersonen jeweils als bedeutsam einzuordnen sind. Gemischt ist das Bild jedoch für den Vergleich zwischen der zeitkompensierten und der klassischen Kontrollbedingung. Für Versuchsperson 2 weist die Datenlage auf einen bedeutsamen Unterschied hin, für Versuchsperson 1 ist der Unterschied zwar deskriptiv zu erkennen (Abbildung 4.4), die genaue Betrachtung der geschätzten Schwellen zeigt jedoch deutlich, dass dieser Unterschied nicht als überzufällig charakterisiert werden kann.

Steigungen. Vergleicht man die Steigungen miteinander so ergeben sich für beide Versuchspersonen keine Hinweise auf bedeutsame Unterschiede zwischen den Steigungen der Experimental- und Kontrollbedingungen (Abbildung 4.5).

Die geschätzten Steigungen im Punkt der Schwelle sind für die Experimentalbedingungen sehr hoch, was für eine trennscharfe Zuordnung zu den verschiedenen Kategorien der Klassifikationsaufgabe spricht. Der daraus resultierende indifferente Bereich ist sehr klein, was nur möglich ist, wenn die Versuchspersonen auch bei diesen vergleichsweise schwierigen Klassifikationen sehr genau arbeiten.

Kritik in Bezug auf die Verwendung einer parametrischen Bootstrapprozedur zur Ermittlung der Standardfehler trotz schlechter Goodness-Of-Fit Werte kann entkräftet werden, da ein Fit mit einer nonparametrischen Bootstrapprozedur zu vergleichbaren Ergebnissen führt. Die Schätzungen der Standardfehler der Schwellen sind exakt gleich oder gar etwas progressiver, die Schätzungen der Steigungen werden in

der nonparametrischen Bootstrapprozedur etwas konservativer geschätzt. Da jedoch bei der hier untersuchten Fragestellung die Schätzungen der Schwelle im Mittelpunkt stehen, wird obiges Prozedere für angemessen erachtet.

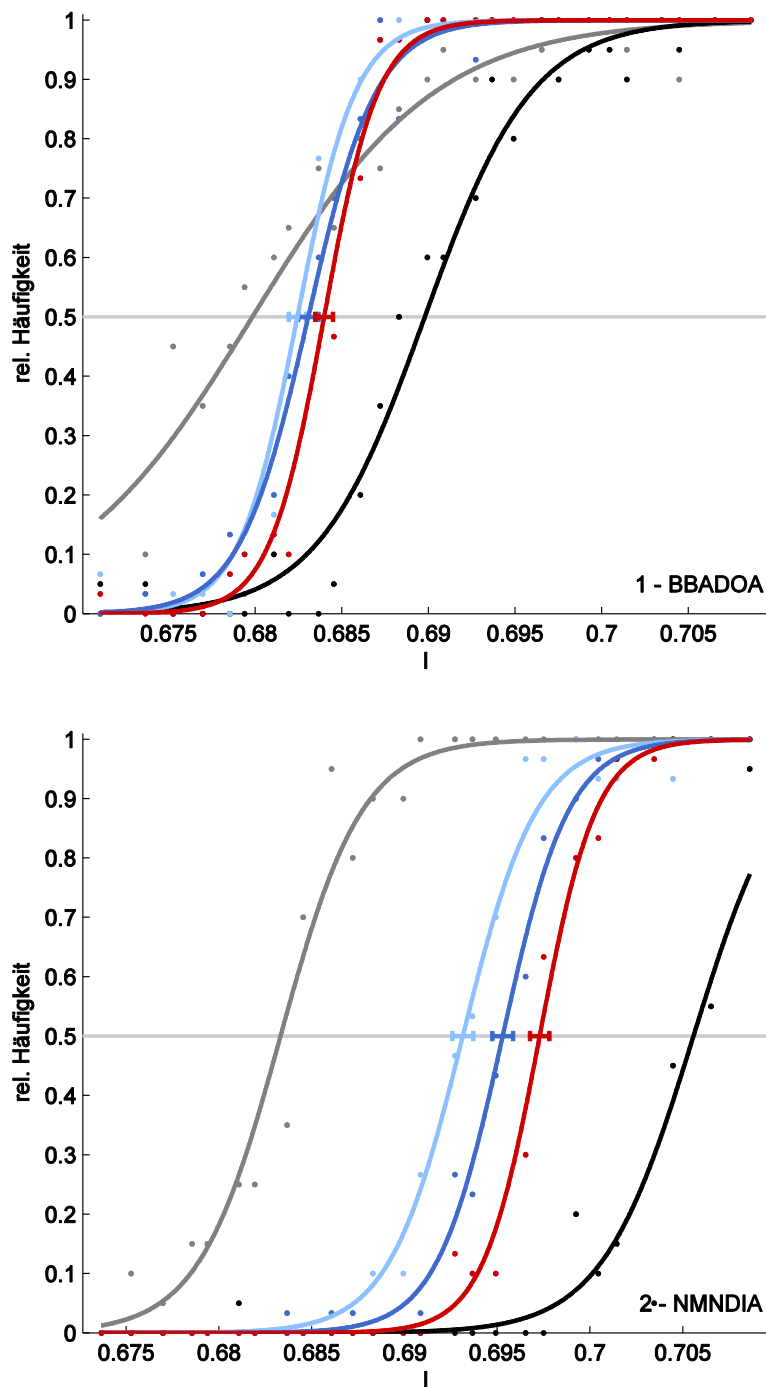


Abbildung 4.3: Ergebnisse aus *Experiment IV*. Relative Häufigkeit der Rot-Kategorisierungen der Testfarben für die fünf Bedingungen (● Baseline grün, ● Baseline rot, ● Kontrollbedingung, ● zeitkompensierte Kontrollbedingung, ● Experimentalbedingung Raumwechsel). Die Kurven zeichnen die jeweils angefitzten Funktionen, die Fehlerbalken bilden die 95%-Konfidenzintervalle der Schwelle ab.

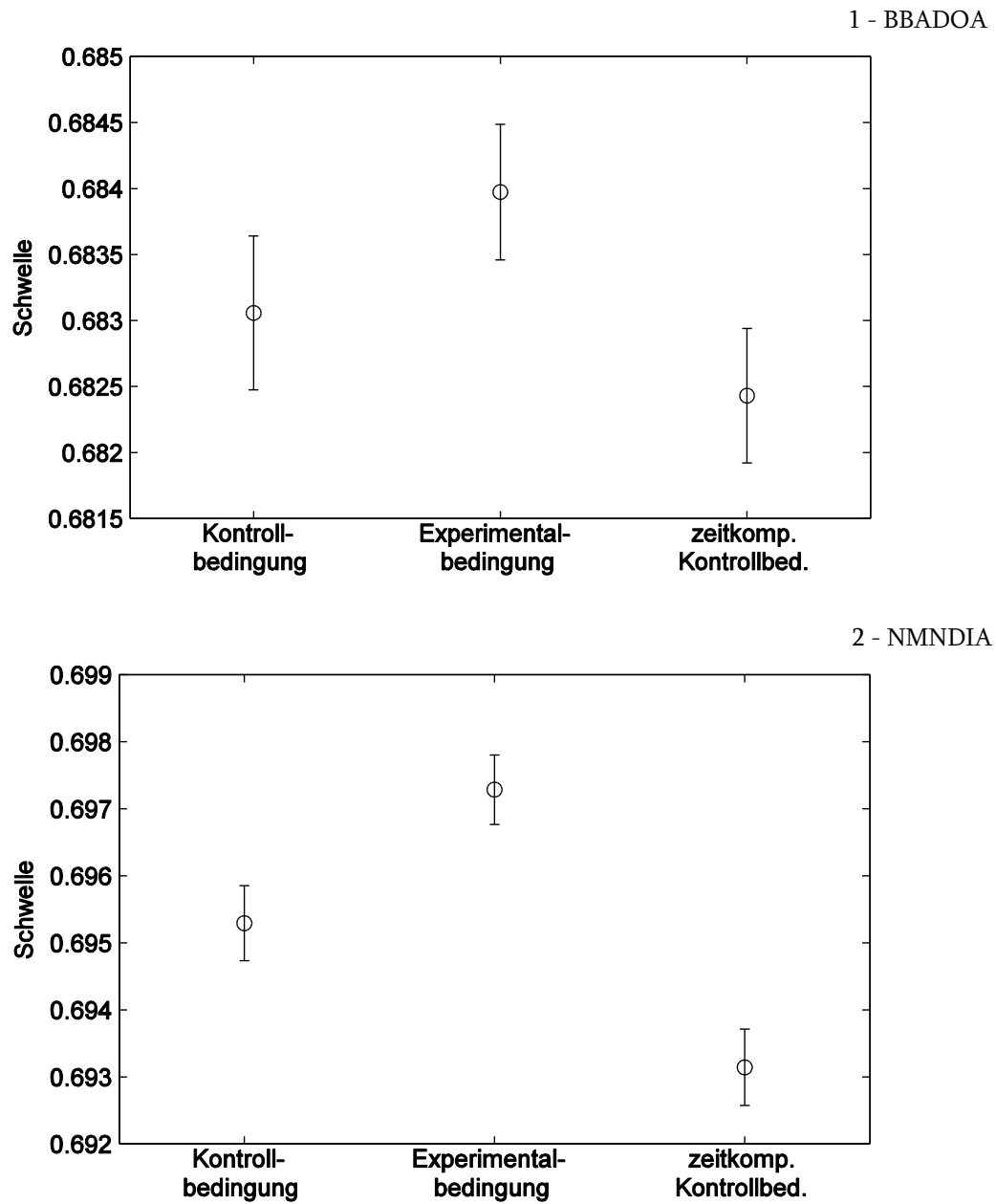


Abbildung 4.4: *Experiment IV.* Schätzung der Schwellen für die Kontrollbedingung, die Experimentalbedingung mit Resetauslöser und die zeitkompensierte Kontrollbedingung. Die Punkte zeigen den Schätzer für die Schwelle, die Fehlerbalken das 95%-Konfidenzintervall, welches mit Hilfe einer parametrischen Bootstrap-Prozedur bestimmt wurde.

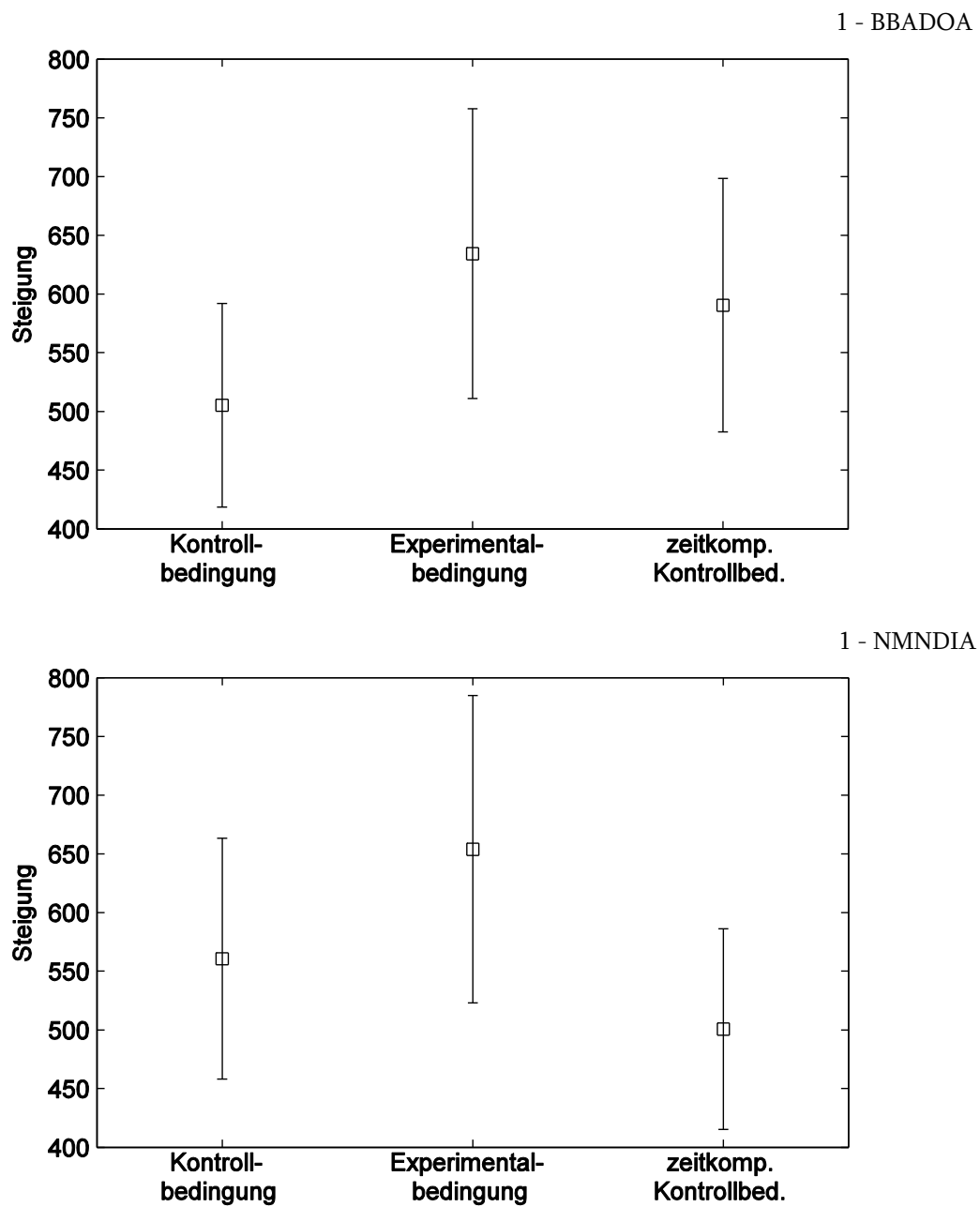


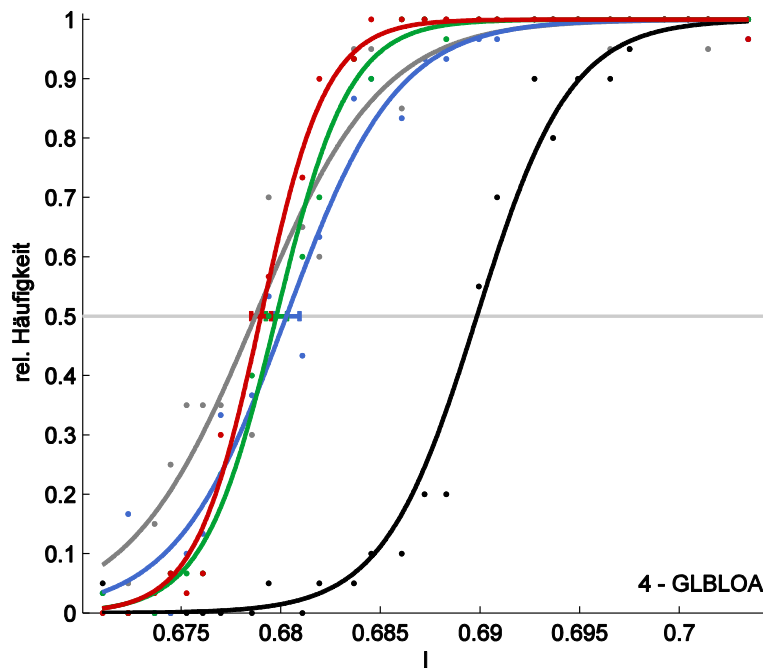
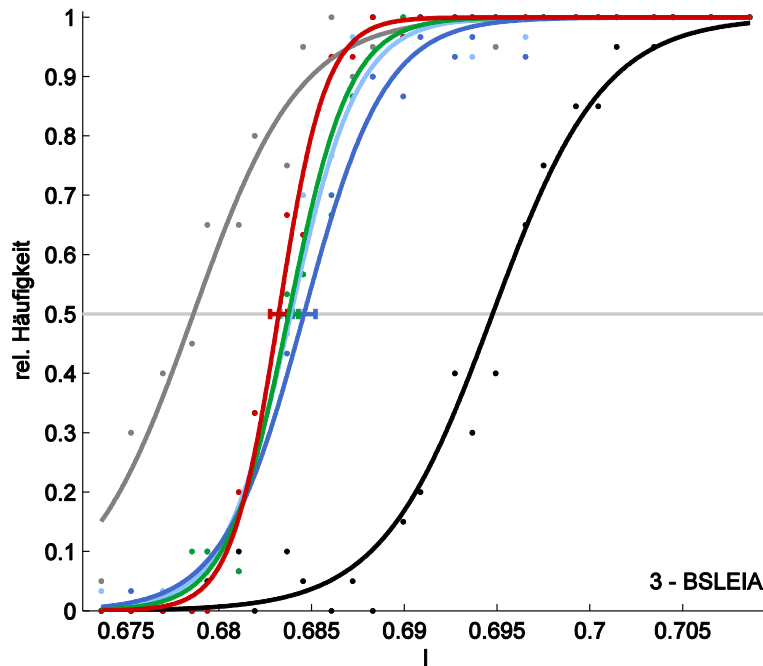
Abbildung 4.5: *Experiment IV.* Schätzung der Steigungen für die Kontrollbedingung, die Experimentalbedingung mit Resetauslöser und die zeitkompensierte Kontrollbedingung. Die Punkte zeigen den Schätzer für die Steigung, die Fehlerbalken das 95%-Konfidenzintervall, welches mit Hilfe einer parametrischen Bootstrap-Prozedur bestimmt wurde.

4.3 Ergebnisse – Experiment V

Angemessenheit des Testfarbensets. Bei der Prüfung der Angemessenheit des Testfarbensets ergaben sich für die Versuchspersonen 3 (BSLEIA) und 5 (RBCDIE) keine Gründe das Testfarbenset anzupassen, für Versuchsperson 4 (GLBLOA) waren jedoch Anpassungen indiziert. Aufgrund der Auswertung des Klassifikationsverhaltens während der ersten vier Sitzungen (Anhang B.7), wird eine Erweiterung im niedrigen Bereich der geringen I -Werte vorgenommen, die durch ein Beschneiden des Testfarbensets im Bereich der größeren I -Werte ausgeglichen wird. Konkret werden die niedrigen I -Werte des Testfarbensets durch eine Testfarbe aus Intervall 1 und drei Testfarben aus Intervall 2, die eine kleinschrittige Messung in diesem Bereich gewährleisten sollen, ergänzt. Als Ausgleich hierfür werden die für diese Versuchsperson nicht aussagekräftigen Testfarben aus Intervall 7 gestrichen.

Ergebnisse. Das Vorgehen bei der Auswertung dieses Experiments entspricht dem in *Experiment IV*. Das bedeutet, auf Basis der relativen Häufigkeit der Klassifikation einer Testfarbe als Rot wurden psychometrische Funktionen für jede Bedingung angepasst. Die psychometrischen Funktionen haben die Form logistischer Funktionen, wobei Schwelle (α) und Steigung (β) frei geschätzt wurden, für die Ratewahrscheinlichkeit (γ) und die Verpasserrate (λ) wurde der Wert auf 0 fixiert. Zum Vergleich wurde die Anpassungen mit im Intervall zwischen 0 und 0.06 freigegebenen Fit für die Verpasserraten wiederholt. Da die ermittelten Goodness-Of-Fit-Indices für diese weniger strenge Annahme keine sichtbaren Verbesserungen zeigen, werden die einfachen Fits mit der auf null fixierten Verpasserrate beibehalten und interpretiert. Beim Vergleich der Lage der angepassten Funktionen (Abbildung 4.6), zeigt sich nicht das erwartete Bild. So zeigt sich, dass die Einführung des rötlichen Auslösereizs bei allen Versuchspersonen im Vergleich zur Kontrollbedingung deskriptiv zu konservativeren Schätzungen der Schwelle führt. Für den grünlichen Auslösereiz zeigt sich dasselbe Bild für die Versuchspersonen 3 und 4. Lediglich für Versuchsperson 5 zeigt sich eine näher am rötlichen maximalen Adaptationspunkt liegende neutrale Schwelle für die Bedingung mit grünlichem Aufleuchten. Die Rötlichkeit der gefundenen neutralen Punkte der verschiedenen Bedingungen widerspricht jedoch der Idee einer einfachen Integration der aufleuchtenden visuellen Information, rein deskriptiv betrachtet. Berechnet man jedoch zusätzlich für die Kontroll- und Experimentalbedingungen mit Hilfe parametrischer Bootstrapverfahren 95%-Konfidenzintervalle für die geschätzten Schwellen, wird deutlich, dass sich nur einzelne bedeutsame Unterschiede zwischen den Bedingungen zeigen (Abbildung 4.7). So unterscheiden sich für Versuchsperson 3 und 4 die geschätzten Schwellen für die Kontrollgruppe und die Experimentalbedingung rotes Aufleuchten, für Versuchsperson 5 finden sich große Unterschiede zwischen den geschätzten Schwellen der beiden Experimentalbedingungen.

Auch in *Experiment V* lassen die hohen geschätzten Steigungen am Punkt der geschätzten Schwellen auf ein sehr genaues Arbeiten der Versuchspersonen bei der Klassifikationsaufgabe schließen (Abbildung 4.8, Anhang B.9).



f.

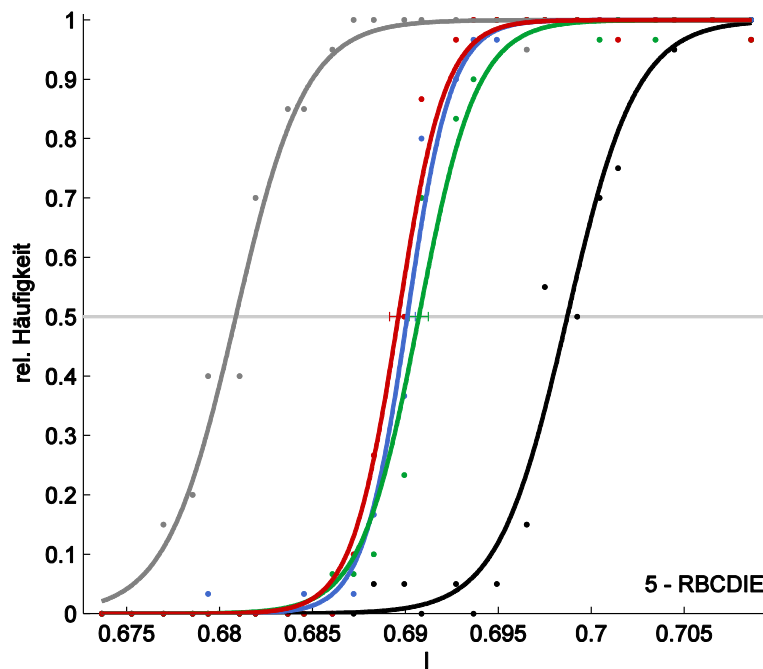
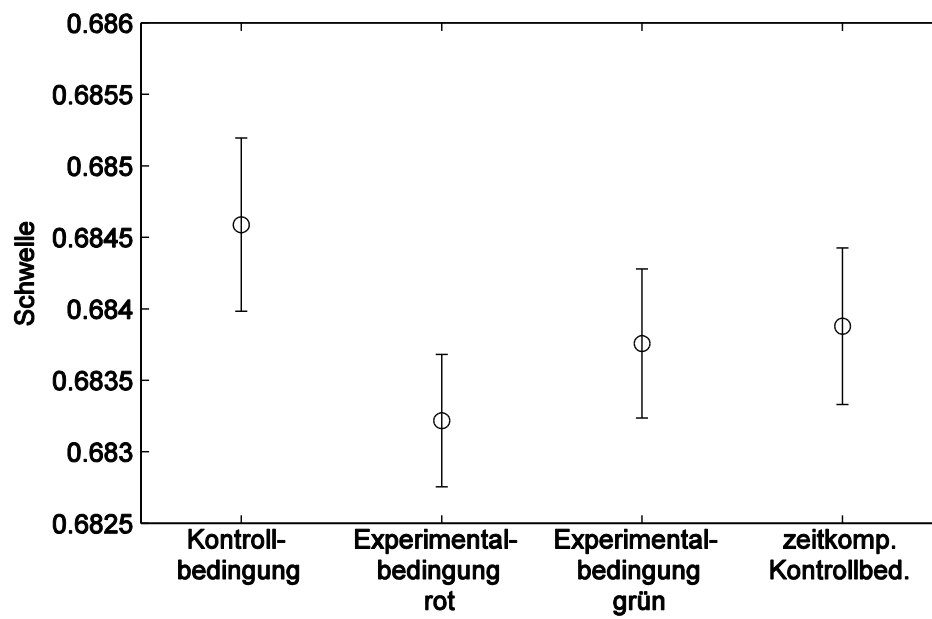
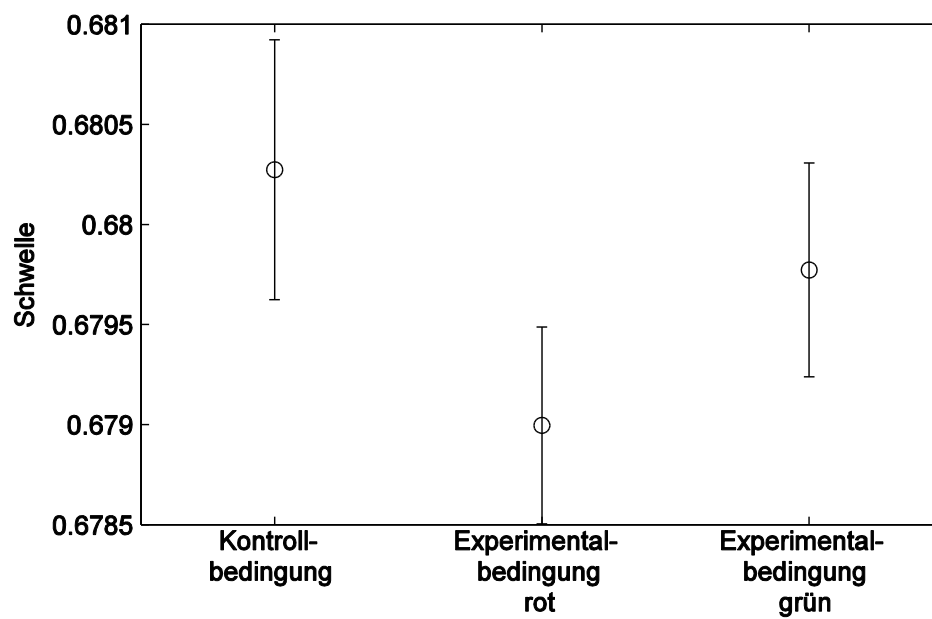


Abbildung 4.6: Ergebnisse aus *Experiment V*. Relative Häufigkeit der rot-Kategorisierungen der Testfarben für die fünf Bedingungen (● Baseline grün, ● Baseline rot, ● Kontrollbedingung, ● zeitkompensierte Kontrollbedingung, ● Experimentalbedingung rotes Aufleuchten, ● Experimentalbedingung grünes Aufleuchten). Die Kurven zeichnen die jeweils angefitzten Funktionen, die Fehlerbalken bilden die 95%-Konfidenzintervalle um die Schwelle ab.

3 - BSLEIA



4 - GLBLOA



f.

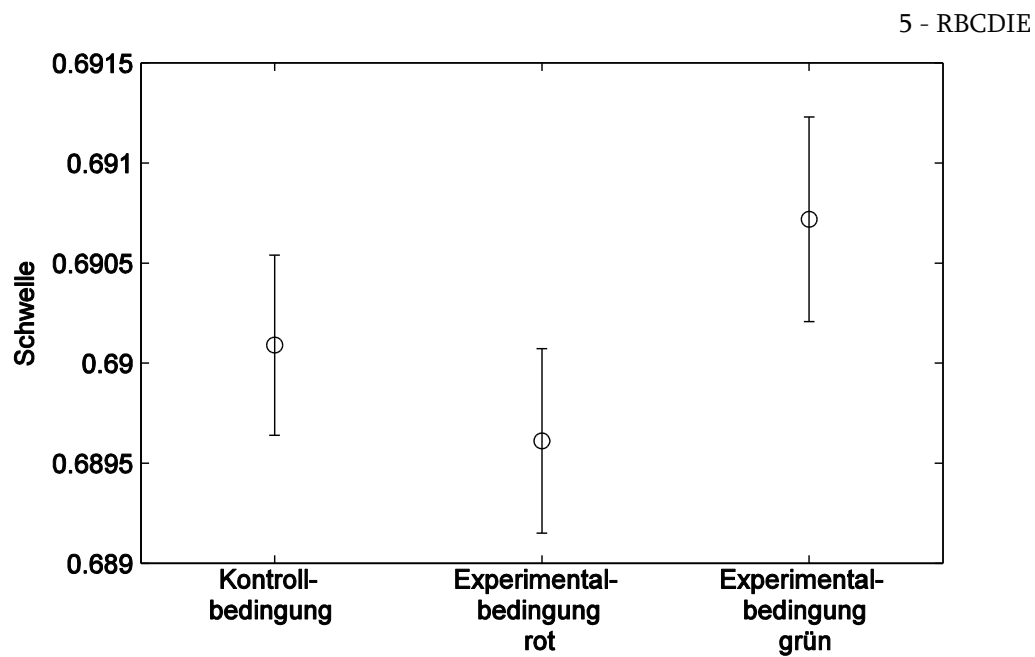
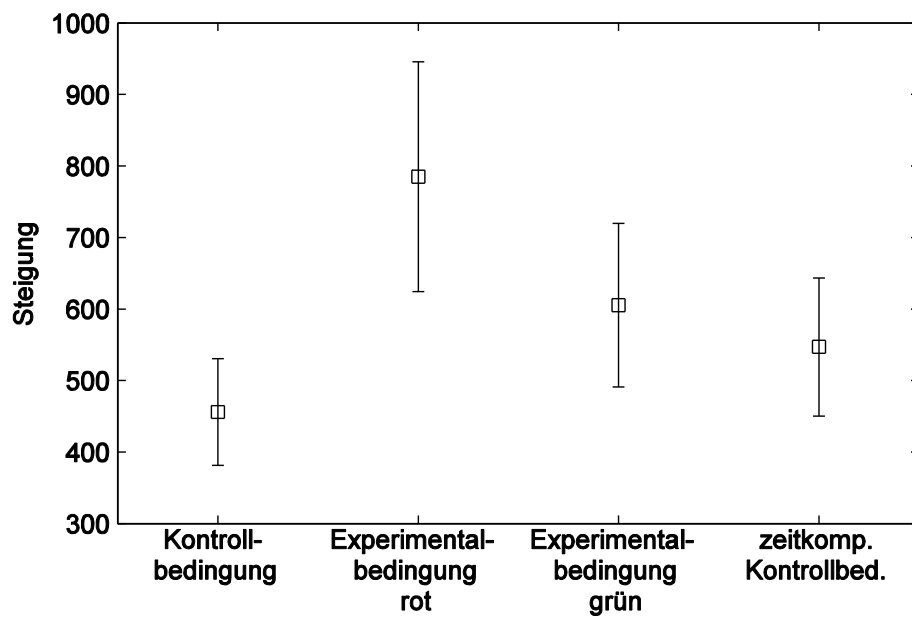
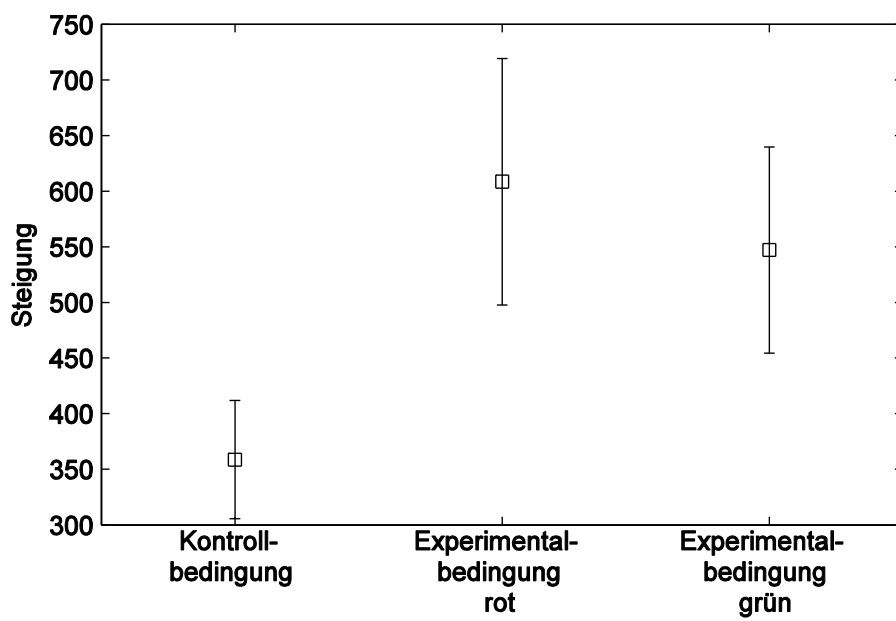


Abbildung 4.7: Ergebnisse *Experiment V* – Schätzer für die Schwelle mit 95%-Konfidenzintervallen. Da die gemessenen Werte nicht den vorab postulierten Hypothesen entsprechen, wurde auf die Erhebung der zeitkompensierten Kontrollbedingung bei den Versuchspersonen 4 und 5 verzichtet.

3 - BSLEIA



4 - GLBLOA



f.

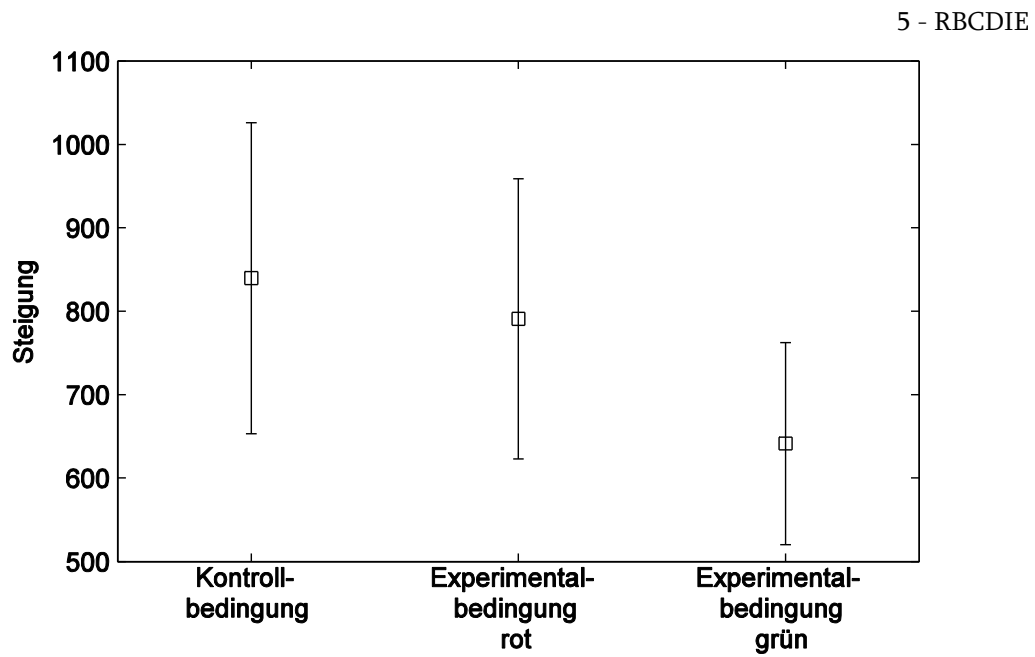


Abbildung 4.8: Ergebnisse *Experiment V* – Schätzer für die Steigungen mit 95%-Konfidenzintervallen. Die zeitkompensierte Kontrollbedingung wurde für VP 4 und VP 5 nicht erhoben.

4.4 Diskussion der Experimente IV und V

Forschungsfrage II stellt den Prozess der temporalen Informationsintegration in den Vordergrund und stellt die Frage, ob ein solcher zeitlicher Integrationsprozess flexibel auf Situationsveränderungen reagieren kann. *Experiment IV* untersucht eine, durch eine Handlung der Versuchsperson herbeigeführte Änderung, durch die die andauernde Beobachtung der Szene unmöglich wird. Die Ergebnisse zeigen, dass beim Vorhandensein eines solchen monitoring-unterbrechenden Auslösereizes während eines Beleuchtungswechsels eine schnellere Anpassung an die neuen Beleuchtungsbedingungen gelingt, als wenn ein solcher Auslösereiz nicht präsentiert wird. Durch das zusätzliche Einführen einer zeitkompensierenden Kontrollbedingung kann die Dauer der monitoring-unterbrechenden Handlung nicht für die schnellere Anpassung an die neuen Beleuchtungsbedingungen verantwortlich gemacht werden.

Einen vergleichbaren Effekt von Kopfbewegungen als monitoring-unterbrechende Auslösereize zeigen Annan und Gilchrist (2004) im Rahmen von Untersuchungen zur Helligkeitskonstanz. Interessant hierbei ist, dass die in *Experiment IV* gewählte Dunkelphase als zeitkompensierende Kontrollbedingung, bei Annan und Gilchrist ebenfalls eine schnellere Anpassung an die neue Helligkeitsbedingung zur Folge hatte. Die in *Experiment IV* vorliegenden Daten zeigen, dass eine solche schnellere Anpassung an die neue Beleuchtungsbedingung nicht eingetroffen ist. Im Gegenteil, die zeitkompensierte Kontrollbedingung zeigt zum Messzeitpunkt eine signifikant geringere Anpassung an die neuen Beleuchtungsverhältnisse als die Experimentalbedingung, welche einen monitoring-unterbrechenden Auslösereiz enthielt. Der Widerspruch zwischen den Ergebnissen in *Experiment IV* und denen in Annan und Gilchrists Untersuchung, lässt sich durch die Rahmenbedingungen unter denen Farb- bzw. Helligkeitskonstanz untersucht wurde, auflösen. So wählten Annan und Gilchrist zur Untersuchung der Helligkeitskonstanz ein räumliches Integrationsparadigma, bei welchem zu einem gegebenen Zeitpunkt viele simultan vorhandenen Informationen integriert werden. Das bedeutet, in diesem Untersuchungsparadigma sind die transienten Signale, welche die Invarianz einer Oberfläche kodieren, von großer Bedeutung. In einem reduzierten zeitlichen Paradigma, wie in *Experiment IV*, in welchem zu jedem Zeitpunkt nur eine Information zur bereits integrierten Information hinzugefügt wird, spielt die Transienz der Signale einer Oberfläche eine untergeordnete Rolle.

Experiment V untersuchte die Rolle monitoring-inhärenter Auslösereize, am Beispiel einer großflächigen Luminanzveränderung. Die Ergebnisse widersprechen insgesamt der Annahme, dass die hier untersuchten monitoring-inhärenten Auslösereize eine schnellere Anpassung an die neue Beleuchtungsbedingung bewirken. Daher legen die

Ergebnisse den Schluss nahe, kurze, großflächige Luminanzveränderungen, bei der temporalen Informationsintegration nicht als Auslösereize für das visuelle System dienen, um eine Veränderung der Informationsintegration zu initiieren. Hieraus jedoch verallgemeinernd die Funktion monitoring-inhärenter Veränderungen als Auslösereize auszuschließen, wäre verfrüht. Da keinerlei Erfahrungen mit der Wirkung monitoring-inhärenter Reize und der Gruppe von Veränderungen die zu diesen Auslösereizen zu zählen sind, vorliegen, könnte die Wahl des Auslösereizes oder deren Operationalisierung als Alternativerklärung dienen.

5. Forschungsfrage III – Die Rolle chromatischer Regularitäten bei der direkten Beurteilung von Beleuchtungswechseln

Dieses Kapitel konzentriert sich auf die Forschungsfrage nach den perzeptuellen Charakteristika eines Beleuchtungswechsels, welche der Betrachter verwendet, um einen natürlichen Beleuchtungswechsel zu identifizieren. Nascimento und Foster (1997) untersuchten Charakteristika eines Beleuchtungswechsels, die bewirken, dass dieser als natürlicher Beleuchtungswechsel und nicht als Veränderung der Oberflächenfarben wahrgenommen wird. Perzeptuell entsteht bei einem natürlichen Beleuchtungswechsel der Eindruck, dass die Verhältnisse zwischen den Oberflächen einer visuellen Szene bei Beleuchtungsveränderungen konstant bleiben. Nascimento und Foster (1997) bezeichnen dies als *relational colour constancy*. Den Grund hierfür sehen sie in einer photometrischen Regelmäßigkeit. Wählt man zufällig zwei Oberflächen einer visuellen Szene aus und betrachtet das Verhältnis der Zapfenerregungen der beiden Oberflächen für jeden der drei Zapfentypen, so stellt man fest, dass dieses Verhältnis unter verschiedenen Beleuchtungssituationen nahezu invariant bleibt.

Wenn die Verhältnisse zwischen zwei Oberflächen bei einem Beleuchtungswechsel invariant bleiben, lässt sich die Veränderung, die ein Beleuchtungswechsel verursacht als multiplikativer Faktor betrachten, wodurch die jeweilige Erregung eines Zapfentyps multiplikativ in die Erregung dieses Zapfentyps unter anderer Beleuchtung überführbar ist. Dieser lineare Zusammenhang wird im Folgenden als exakte Normalisationskompatibilität der Zapfenerregungsverhältnisse bezeichnet. In ihrer Arbeit zeigen Nascimento und Foster (1997), dass Versuchspersonen diejenigen Beleuchtungswechsel als natürliche auswählen, die keinesfalls natürlich sind sondern solche exakt invarianten Verhältnisse, in diesem Fall nebeneinanderliegender, Oberflächen unter verschiedenen Beleuchtungen darstellen. Simuliert man nun natürliche Beleuchtungswechsel, indem man das Farbsignal für zwei verschiedene Beleuchtungen, die jeweils auf dieselben Oberflächen fallen berechnet, findet man nur annähernd konstante Verhältnisse, wobei Nascimento und Foster die Abweichungen von der perfekten Invarianz als unsystematisch und zufällig beschreiben. Zudem stellten Nascimento und Foster (1997) fest, dass diese Präferenz für Beleuchtungswechsel mit perfekter Invarianz der Zapfenerregungsverhältnisse mit im Vergleichsreiz steigendem variantem Anteil zunimmt. Die Autoren werten den nicht linearen Anteil der Zapfenerregungsveränderung als unsystematisch und schließen daher, dass das Wahrnehmungssystem die Konstanz der Zapfenerregungsverhältnisse als Hinweis für eine Beleuchtungsveränderung interpretiert, Abweichungen von dieser Konstanz hingegen als

Hinweis für eine anderweitige Veränderung der visuellen Szene deutet, weshalb die tatsächlich natürlichen Beleuchtungswechsel mit diesen zufälligen Abweichungen von den Versuchspersonen nicht bevorzugt würden.

Betrachtet man den nicht-linearen Anteil eines Beleuchtungswechsels genauer, zeigt sich, dass dieser nicht nur unsystematische Streuung enthält sondern auch systematische Anteile, wie chromatisitätsabhängige Luminanzveränderungen, die Golz (2005) genau beschrieben und intensiv untersucht hat (Abschnitt 2.3.2.1). Diese variiert systematisch mit der Veränderung der Beleuchtungseigenschaften insofern, dass bei einem gegebenen chromatischen Mittelwert eine rötlichere Beleuchtung zu einer höheren Luminanz rötlicher Oberflächen führt und somit die Korrelation zwischen Luminanz und Rötlichkeit im visuellen Input positiver wird. In ihrer Arbeit konnten Golz und MacLeod (2002) verdeutlichen, dass ebendiese chromatische Szenenstatistik gemeinsam mit dem chromatischen Mittelwert des visuellen Inputs die Unterscheidung zwischen der Veränderung der Oberflächenfarbe und einer Veränderung der Beleuchtung unterstützt.

Hypothesen. Aus diesen beiden Befundlagen ergibt sich analog zu Nascimento und Foster (1997) die Erwartung, dass gegenüber natürlichen Beleuchtungswechseln, Beleuchtungswechsel bevorzugt werden, die exakt normalisationskompatibel sind. Diese Bevorzugung ist umso stärker, je größer der Unterschied zwischen der exakt normalisationskompatiblen und der natürlichen Beleuchtungsveränderungskomponente ist (*Hypothese IV*).

Unter Einbezug der Befunde von Golz und MacLeod (Golz, 2005, 2008; Golz & MacLeod, 2002) lässt sich die von Nascimento und Foster (1997) getroffene Erwartung präzisieren und dahingehend erweitern, dass gegenüber Beleuchtungswechseln die exakt normalisationskompatibel sind, Beleuchtungswechsel bevorzugt werden, die exakt normalisationskompatibel sind und eine Chromatizitäts-Intensitäts-Änderung aufweisen. Diese Bevorzugung ist umso stärker, je größer der Unterschied zwischen den beiden Beleuchtungswechseltypen ist (*Hypothese V*).

5.1 Allgemeine Methoden

Zur Überprüfung der Hypothesen wird das von Nascimento und Foster (1997) eingeführte Paradigma in allen wesentlichen Elementen übernommen und um eine Experimentalbedingung erweitert. Das zentrale Element dieses Untersuchungsparadigmas ist die Präsentation zweier aufeinanderfolgender Beleuchtungswechsel mit jeweils verschiedenen Eigenschaften, verbunden mit der von Nascimento und Foster übernommenen Aufgabe der Versuchsperson denjenigen Beleuchtungswechsel zu identifizieren, „der mehr wie ein natürlicher Beleuchtungswechsel aussieht“. Das verwen-

dete Paradigma simuliert einen Beleuchtungswechsel durch die direkt aufeinanderfolgende Darstellung zweier Bilder, deren dargestellte Oberflächen einmal unter der Ausgangsbeleuchtung und einmal unter der Zielbeleuchtung berechnet wurden. Hierbei wird der Korrekturmodus eines Beleuchtungswechsels variiert, sodass ein natürlicher (*NAT*), ein exakt-normalisationskompatibler (*XN*) oder ein exakt-normalisationskompatibler und chromatisitäts-intensitäts korrigierter Beleuchtungswechsel (*XN&CI*) simuliert werden. Des Weiteren werden aus Gründen der Vielfältigkeit die Ausgangs- und Zielbeleuchtung, sowie die zu Grunde liegende Farbauswahl und die Anordnung dieser Farbflächen variiert (vgl. Tabelle 5.1). Abbildung 5.1 bietet einen Überblick über den zeitlichen Ablauf eines Experimentaldurchgangs, vom Starten des Durchgangs durch die Versuchsperson, über die Präsentation des ersten Beleuchtungswechsels, einer Pause von einer Sekunde, der Präsentation des zweiten Beleuchtungswechsels, der zeitlich unbegrenzten Antworteingabe sowie dem kurzen Aufleuchten der eingegebenen Antwort. Hierbei wird deutlich, dass der einzige experimentelle Unterschied zwischen den beiden Beleuchtungswechseln eines Durchgangs im Korrekturmodus liegt, sprich in der Art der Berechnung des Stimulus unter der Zielbeleuchtung.

Die Positionen im Bild und die zugrunde liegenden Oberflächenreflektanzspektren der Farbflächen in einem konkreten Stimulus bleiben in allen vier dargestellten Beleuchtungssituationen eines Durchgangs konstant. Die zentrale unabhängige Variable ist daher der durch die beiden Beleuchtungswechsel miteinander verglichene Typ des Korrekturmodus. Um verschiedene Grade der Abweichung zwischen den durch die unterschiedlichen Korrekturmodi vorhergesagten Ergebnissen der Beleuchtungswechsel zu erreichen und um eine Vielfalt an Stimuli zu erzeugen werden weitere Variablen variiert. Hierzu gehört die Anzahl der Kombinationen aus Ausgangs- und Zielbeleuchtung, die Anzahl der Sets aus Oberflächenfarben sowie die Variation der geometrischen Anordnung der Oberflächen im Stimulus. Tabelle 5.1 gibt einen Überblick über die in den drei Experimenten verwendeten Reizeigenschaften. Details zur Reizgenerierung werden im folgenden Teilkapitel vorgestellt (5.1.1)

Alle Daten wurden in einem abgedunkelten Raum an einem sorgfältig kalibrierten LCD-Monitor (Eizo ColorEdge CG243W, mit 8 Bit / Kanal) erhoben. Kalibrierung und Umrechnung zu LMS Zapfenerregungswerten (A. Stockman et al., 1993) wurden anhand von Standardempfehlungen (Brainard, 1989; Golz & MacLeod, 2003) mit einem Kolorimeter (LMS 1290) durchgeführt. Der Monitor war in einen mit schwarzem Moosgummi ausgekleideten Reflektanztunnel eingebettet, weshalb sich die Beobachter in einer Entfernung von 57 cm zum Monitor befanden.

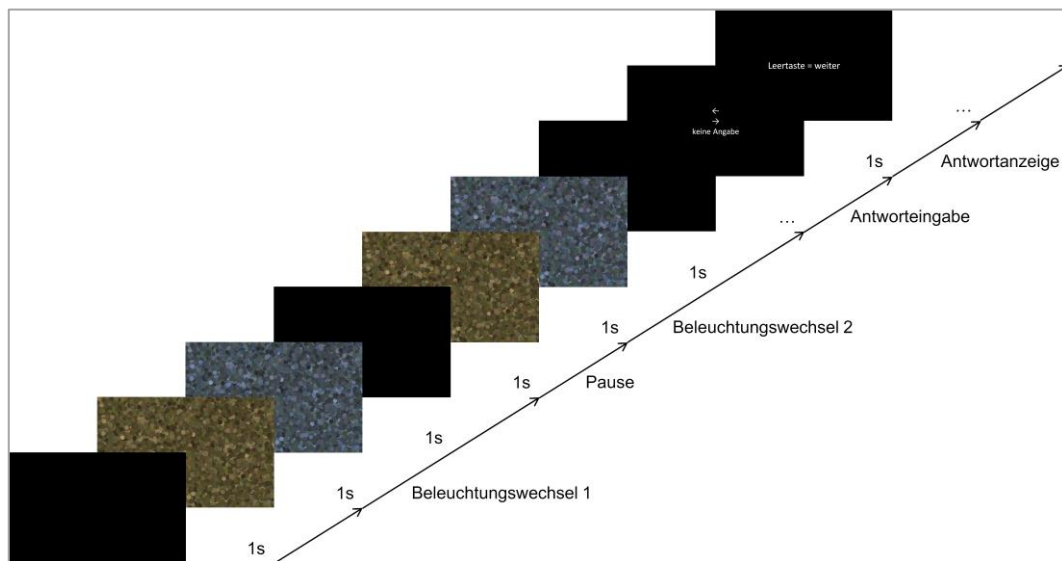


Abbildung 5.1: Allgemeine Ablaufskizze eines Durchgangs. In jedem Durchgang wurden zwei Beleuchtungswechsel präsentiert. Ein Beleuchtungswechsel bestand aus der Präsentation eines Seuratstimulus unter der Ausgangsbeleuchtung und der anschließenden Präsentation desselben Seuratstimulus unter der Zielbeleuchtung, wobei die zur Simulation des Beleuchtungswechsels im Zielstimulus vorhandenen Hinweisreize in Abhängigkeit von der Bedingung variierten. Ein Durchgang beginnt mit der Präsentation eines dunklen Bildschirms, gefolgt vom ersten Beleuchtungswechsel. Nach einer Pause von 1 s, bei der der Bildschirm wieder dunkel wurde, wurde der zweite Beleuchtungswechsel präsentiert. Anschließend wurde der Bildschirm wieder dunkel und die Versuchsperson hatte die Aufgabe ihre Wahl einzugeben.

Tabelle 5.1: Gegenüberstellung der zentralen Eigenschaften der Versuchspläne und Versuchsaufbauten der drei Experimente (VI, VII, VIII).

Experiment VI	Experiment VII	Experiment VIII
<i>Direkt miteinander verglichene Korrekturmodi</i>		
$XN \leftrightarrow NAT$	$XN \leftrightarrow NAT$	$XN \leftrightarrow NAT$
$XN \leftrightarrow XN \& CI$	$XN \leftrightarrow XN \& CI$	$XN \leftrightarrow XN \& CI$
$NAT \leftrightarrow XN \& CI$		
<i>Beleuchtungen*</i>		
CIE 4000 Kelvin	CIE 4000 Kelvin	CIE 4000 Kelvin
CIE 7000 Kelvin	CIE 7000 Kelvin	CIE 7000 Kelvin
CIE 20000 Kelvin	CIE 20000 Kelvin	CIE 20000 Kelvin
exhaustiv gepaart	exhaustiv gepaart	exhaustiv gepaart
<i>Zapfensensitivitätsfunktionen</i>		
Stockman et al. (1993)	Stockman et al. (1993)	Stockman et al. (1993)
<i>Oberflächenreflektanzen</i>		
Ruderman, Cronin und Chiao (1998)	Brown (2003)	Brown (2003)
12 Landschaftszenen mit jeweils 16384 Reflektanzspektren	344 Reflektanzspektren von 122 Blumen, 108 Früchten, 114 Blättern	344 Reflektanzspektren von 122 Blumen, 108 Früchten, 114 Blättern
<i>Darstellung</i>		
Seurat 48.91 ° * 31.73° Sehwinkel	Seurat 48.91° * 31.73° Sehwinkel	Quadrat mit 7*7 Feldern 6° * 6° Sehwinkel
<i>Variation der geometrischen Anordnung der Stimuli</i>		
nein	in 10 Varianten	nein
<i>Urteile pro Korrekturmodusvergleichsbedingung und Versuchsperson</i>		
144	360	476

* Von der Commission Internationale d'Eclairage veröffentlichte spektrale Energieverteilungsfunktionen von Tageslichtbeleuchtungen mit den angegebenen Farbtemperaturen

5.1.1 Berechnung der Beleuchtungswechsel unter verschiedenen Korrekturmodi

Ein Beleuchtungswechsel wurde durch zwei Bilder dargestellt. Das erste Bild zeigte den Reiz unter der Ausgangsbeleuchtung und wurde immer durch die Simulation

natürlicher Bedingungen berechnet. Das zweite Bild zeigte den Reiz unter der Zielbeleuchtung, wobei jeweils der zur experimentellen Manipulation gewählte Korrekturmodus zur Berechnung des zweiten Bildes verwendet wurde. Als Basis für die Simulation der Beleuchtungswechsel dienten Oberflächenreflektanzspektren natürlicher Objekte, CIE Tageslichtspektren mit einer Farbtemperatur zwischen 4000 und 20000 Kelvin sowie die Zapfensensitivitätsfunktionen von Stockman et al. (1993). Für alle Spektren wurde durch schrittweise kubische Spline-Interpolationen in 1 nm-Schritten der Wertebereich zwischen 403 und 719 nm bestimmt.

Natürlicher Beleuchtungswechsel (NAT). Die Simulation eines natürlichen Beleuchtungswechsels wird durch die Berechnung eines Oberflächenmusters unter der Ausgangsbeleuchtung (Gleichung 5.1) und der Berechnung desselben Oberflächenmusters unter der Zielbeleuchtung (Gleichung 5.2) implementiert. Die Simulation einer Szene unter der Ausgangs- bzw. Zielbeleuchtung wird durch die punktweise Multiplikation der Oberflächenreflektanzspektren im Bild ($S_{x,y}(\lambda)$) mit dem Beleuchtungsspektrum ($I(\lambda)$) und den Zapfensensitivitätsfunktionen ($\bar{c}_j(\lambda)$) durchgeführt, deren Summen die errechnete Zapfenerregung für die drei Zapfen ($j = L, M, S$) ergeben.

$$CE_{j_{x,y}}^A = \sum_{\lambda} S_{x,y}(\lambda) * I^A(\lambda) * \bar{c}_j(\lambda) \quad 5.1$$

$$CE_{j_{x,y}}^Z = \sum_{\lambda} S_{x,y}(\lambda) * I^Z(\lambda) * \bar{c}_j(\lambda) \quad 5.2$$

mit der Zapfenerregung (CE), für die drei Zapfentypen für jeden Bildpunkt (x, y) unter der Ausgangs- (I^A) bzw. Zielbeleuchtung (I^Z)

Exakt normalisationskompatibler Beleuchtungswechsel (XN). Als exakt normalisationskompatibler Beleuchtungswechsel wird hier äquivalent zu Nascimento und Foster (1997) ein simulierter Beleuchtungswechsel bezeichnet, der ausschließlich den linearen Anteil der veränderten Zapfenerregung zwischen Ausgangs- und Zielbeleuchtung berücksichtigt. Hierzu wird für jeden Zapfentyp ein oberflächenunabhängiger Skalierungsfaktor (c_j , mit $j = L, M, S$) ermittelt, der daher für alle Oberflächen des Stimulus gleich ist. Bei einem exakt normalisationskompatiblen Beleuchtungswechsel bleiben die Verhältnisse der Zapfenerregungen zwischen den verschiedenen Oberflächen des Bildes konstant, es entsteht ein Spezialfall der Veränderung des chromatischen Mittelwerts. Geschätzt wird dieser Skalierungsfaktor über eine lineare Regression (Kleinstquadratkriterium und einem y-Achsenabschnitt von 0). Die Berechnung des Ausgangsstimulus erfolgt somit wie in Gleichung 5.1 beschrieben, die des Zielstimulus wird in Gleichung 5.3 zusammengefasst.

$$CE_{j,x,y}^Z = c_j^{A \rightarrow Z} * CE_{j,x,y}^A \quad 5.3$$

Ermittlung der Zapfenerregung (CE) für die exakt normalisationskompatible Simulation unter der Zielbeleuchtungsbedingung (I^Z), für die drei Zapfentypen ($j = L, M, S$) für jeden Bildpunkt (x, y) unter Verwendung des Skalierungsfaktors $c_j^{A \rightarrow Z}$ unter der Ausgangsbeleuchtungsbedingung (I^A)

Exakt normalisationskompatible und chromatizitäts-intensitäts korrigierte Beleuchtungswechsel (XN&CI). Bei dieser Bedingung der Beleuchtungswechselsimulation werden zwei zentrale systematische Veränderungen, die in einem natürlichen Beleuchtungswechsel vorhanden sind, isoliert und zur Simulation eines Beleuchtungswechsels verwendet. Neben der exakt normalisationskompatiblen Veränderung wird die chromatizitätsabhängige Luminanzveränderung hinzugezogen, wobei die Ausprägung dieses zweiten Skalierungsfaktors von der Chromatizität der Oberflächen abhängt und sich somit für jede Oberfläche des Bildes unterscheiden kann. Die Berechnung des Bildes unter der Ausgangsbeleuchtung ist eine Bildberechnung unter natürlicher Beleuchtung (Gleichung 5.1). Die Berechnung des Zielbildes, sprich eines exakt normalisationskompatibel und chromatizitäts-intensitäts korrigierten, erfolgt wie in Gleichung 5.4 und Gleichung 5.5 beschrieben.

$$CE_{j,x,y}^Z = c_j^{A \rightarrow Z} * CE_j^A * d_{j,x,y}^{A \rightarrow Z} \quad 5.4$$

wobei $CE_{j,x,y}^Z$ die Zapfenerregungen für die drei Zapfentypen ($j = L, M, S$) unter der simulierten Zielbeleuchtungsbedingung (Z) ist, und somit über einen oberflächenunabhängigen Skalierungsfaktor ($c_j^{A \rightarrow Z}$) aus den Bilddaten der Ausgangsbedingung (A) und den oberflächenabhängigen Veränderungsfaktor für die chromatizitäts-intensitäts Veränderung ($d_{j,x,y}^{A \rightarrow Z}$) gewonnen wird.

$$d_{j,x,y}^{A \rightarrow Z} = a_j^{A \rightarrow Z} + b_{1j}^{A \rightarrow Z} * l_{x,y}^A + b_{2j}^{A \rightarrow Z} * s_{x,y}^A \quad 5.5$$

wobei sich der chromatizitäts-intensitäts Korrekturfaktor ($d_{j,x,y}^{A \rightarrow Z}$) für jede Oberfläche (x,y) im Bild aus dem gewichteten Einfluss ($b_{1j}^{A \rightarrow Z}$) auf die individuelle l -Chromatizität ($l_{x,y}^A$) sowie dem ($b_{2j}^{A \rightarrow Z}$) auf die individuelle s -Chromatizität ($s_{x,y}^A$), ergänzt durch einen konstanten Faktor zusammensetzt.

Mathematisch wird die die chromatizitäts-intensitäts Korrektur durch eine multiple Regression gelöst (Gleichung 5.5), bei der die Chromatizitäten der Ausgangsbeleuchtung (in MacLeod-Boynton l - und s -Werten) als Prädiktoren für den nicht durch den exakt normalisationskompatiblen Anteil der Veränderung bei einem Beleuchtungswechsel erklärbaren Anteil verwendet werden. Dabei wird der Ordinatenabschnitt

$a_j^{A \rightarrow Z}$ so gewählt, dass die mittleren Zapfenerregungen denen unter der exakt normalisationskompatiblen Bedingung entsprechen.

5.1.2 Bestimmung der Abweichung verschiedener Beleuchtungswechsel-simulationen

Zur Prüfung der Hypothesen interessiert die Präferenz von exakt normalisationskompatibel simulierten Beleuchtungswechseln gegenüber natürlichen Beleuchtungswechseln sowie die Präferenz exakt normalisationskompatibler und chromatisitätsintensitäts korrigierter Beleuchtungswechsel vor exakt normalisationskompatiblen Beleuchtungswechseln. Verwendet man zur Prüfung dieser Hypothesen verschiedene Oberflächenzusammenstellungen gemeinsam mit verschiedenen Beleuchtungen zwischen denen gewechselt wird, so erreicht man eine Vielfalt unterschiedlicher Stimuli, deren simulierte Beleuchtungswechselbedingungen sich unterschiedlich stark von den natürlichen unterscheiden. Dies ermöglicht, die Präferenz für einen bestimmten Korrekturmodus in Abhängigkeit von dessen Abweichung von einem natürlichen Beleuchtungswechsel zu untersuchen.

Relative Abweichung der Zapfenerregungsverhältnisse als Maß für die Abweichung eines natürlichen Beleuchtungswechsels von einem exakt normalisationskompatibel simulierten ($\Delta(CER)$). Nascimento und Foster (1997) stellten die mittlere Veränderung des Verhältnisses der durch Oberflächenpaare verursachten Zapfenerregung einer visuellen Szene als Maß für den Abweichungsgrad zwischen einem natürlichen und einem exakt normalisationskompatibel modifizierten Beleuchtungswechsel in den Vordergrund. Basis ist die Idee, dass Beobachter zwischen Oberflächenveränderungen und Beleuchtungsveränderungen gut unterscheiden können, die sie durch relationale Farbkonstanz gewinnen, also das bei Beleuchtungsveränderungen ihrer Ansicht nach annähernd gleich bleibende Verhältnis zwischen zwei Oberflächen einer Szene. Daher stehen die Verhältnisse der Zapfenerregungen nebeneinander liegender Flächen unter einer Beleuchtung im Zentrum. Bei natürlichen Beleuchtungswechseln indiziert eine von Null verschiedene Differenz zwischen den Zapfenerregungsverhältnissen vor und nach einem Beleuchtungswechsel eine Abweichung vom chromatischen Mittelwert (vgl. Gleichung 5.6). Aufgrund der Geometrie der Seuratstimuli, wird in Experimenten mit Seuratstimuli eine Anpassung vorgenommen. Es werden nicht die Verhältnisse nebeneinanderliegender Flächen berechnet sondern die Verhältnisse jeweils zufällig ausgewählter Paare.

$$\Delta(CER) = \frac{|r^A - r^Z|}{\min\{|r^A|, |r^Z|\}} \text{ mit} \quad 5.6$$

$$|r^A - r^Z| = \sqrt{(r_L^A - r_L^Z)^2 + (r_M^A - r_M^Z)^2 + (r_S^A - r_S^Z)^2}$$

$|r^A| = \sqrt{r_L^{A^2} + r_M^{A^2} + r_S^{A^2}}$ wobei $r_L^{A^2}$ ein Vektor aus Zapfenerregungsverhältnissen verschiedener Oberflächen unter der Ausgangsbeleuchtung A, für den langwellig sensitiven Zapfentyp (L) ist. Die senkrechten Balken indizieren in diesem Fall einen Vektor.

Nascimento und Foster (1997) wählten bei ihren Untersuchungen Mondrian-Stimuli aus 49 quadratischen Flächen, wiederum zu einem Quadrat angeordnet. In den *Experimenten VI* und *VII* wird mit Seuratstimuli gearbeitet (vgl. Abb. Z.2), die aus einer großen Anzahl an zufälliger Position gezeichneter Kreise bestehen, welche die gesamte Stimulusoberfläche bedecken. Daher werden in diesen Experimenten die Zapfenerregungsverhältnisse in etwas anderer Weise geschätzt. Jeder gezeichnete Kreis kann von 6 weiteren sich nicht überlappenden Kreisen, auch Kontakt- oder Kusszahl genannt, umgeben sein. Diese Näherung wird verwendet, um die Anzahl zufällig aus dem Oberflächenset des Stimulus gezogener Oberflächenpaare zu bestimmen. Auf Basis dieser gezogenen Paare werden dann nach Gleichung 5.6 die Differenzen der Zapfenerregungsverhältnisse geschätzt. In *Experiment VIII* wurden analog zu Nascimento und Foster (1997) Mondrianstimuli mit 49 quadratisch angeordneten Flächen verwendet. Hier wurden die bis zu acht Zapfenerregungsverhältnisse mit den angrenzenden Feldern berechnet.

Direktes Abweichungsmaß der Zapfenerregung als Maß für die Abweichung eines natürlichen Beleuchtungswechsels von einem exakt normalisationskompatibel simulierten. Eine mathematisch direkt auf dem Abweichungsgrad aufbauende Bestimmung der Abweichung eines natürlichen Beleuchtungswechsels von dem eines exakt normalisationskompatibel simulierten, kann wie in Gleichung 5.7 beschrieben erfolgen. Hierbei wird der Skalierungsfaktor der exakt normalisationskompatiblen Beleuchtungswechselsimulation $c_j^{A \rightarrow Z}$ in Bezug zur, durch einen natürlichen Beleuchtungswechsel $f_{NAT}^{A \rightarrow Z}{}_{j,x,y}$ verursachten Veränderung gesetzt. Um die erhaltenden Werte über verschiedene Stimuli hinweg vergleichbar zu machen, wird der so ermittelte Unterschied mit der Anzahl der verglichenen Oberflächen (N) und zusätzlich mit dem maximal darstellbaren Weiß (w_j , $j = L, M, S$) gewichtet.

$$\Delta(\text{NAT}, \text{XN})_j = \frac{1}{w_j} * \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N \sqrt{\left(\frac{c_j^{A \rightarrow Z} - f_{\text{NAT}j_{x,y}}^{A \rightarrow Z}}{c_j^{A \rightarrow Z}} \right)^2}, \quad 5.7$$

wobei $f_{\text{NAT}j_{x,y}}^{A \rightarrow Z} = \frac{CE_{\text{NAT}j_{x,y}}^Z}{CE_{j_{x,y}}^A}$

Direktes Abweichungsmaß der Zapfenerregung als Maß für die Abweichung eines exakt normalisationskompatibel und chromatizitäts-intensitäts korrigierten Beleuchtungswechsels von einem exakt normalisationskompatibel simulierten $\Delta(\text{NAT}, \text{XN})$. Die Bestimmung des Abweichungsgrades eines exakt normalisationskompatibel und chromatizitäts-intensitäts korrigierten Beleuchtungswechsels von einem exakt normalisationskompatiblen Beleuchtungswechsel (Gleichung 5.8) erfolgt analog zu der im vorausgehenden Abschnitt beschriebenen. In diesem Fall wird der Unterschied zwischen der exakt normalisationskompatiblen Bedingung, spezifiziert durch den Skalierungsfaktor $c_j^{A \rightarrow Z}$, und der exakt normalisationskompatibel und chromatizitäts-intensitäts korrigierten Bedingung ($f_{\text{XN\&CI}j_{x,y}}^{A \rightarrow Z}$) ermittelt, der sich in diesem Fall durch den Skalierungsfaktor $d_{j_{x,y}}^{A \rightarrow Z}$ beschreiben lässt.

$$\Delta(\text{XN\&CI}, \text{XN})_j = \frac{1}{w_j} * \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N \sqrt{\left(\frac{c_j^{A \rightarrow Z} - f_{\text{XN\&CI}j_{x,y}}^{A \rightarrow Z}}{c_j^{A \rightarrow Z}} \right)^2} = \quad 5.8$$

$$\frac{1}{N} \sum \sqrt{\left(1 - d_{j_{x,y}}^{A \rightarrow Z} \right)^2}, \quad \text{wobei } f_{\text{XN\&CI}j_{x,y}}^{A \rightarrow Z} = \frac{CE_{\text{XN\&CI}j_{x,y}}^Z}{CE_{j_{x,y}}^A}$$

mit ($w_j, j = \text{L, M, S}$) als maximal darstellbarem Weiß, $f_{\text{XN\&CI}j_{x,y}}^{A \rightarrow Z}$ als der durch einen exakt normalisationskompatibel und chromatizitäts-intensitäts korrigierten Beleuchtungswechsel verursachten Veränderung

Direktes Abweichungsmaß der Zapfenerregung als Maß für die Abweichung eines natürlichen Beleuchtungswechsels von einem exakt normalisationskompatibel und chromatizitäts-intensitäts korrigierten Beleuchtungswechsel $\Delta(NAT, XN\&CI)$. Um den Grad der Abweichung zwischen einem natürlichen Beleuchtungswechsel und einem exakt normalisationskompatibel und chromatizitäts-intensitäts korrigierten Beleuchtungswechsel zu bestimmen bietet sich das in Gleichung 5.9 vorgestellte Maß an, das sich analog zu den Überlegungen, die zu Gleichung 5.7 und 5.8 führen, ableiten lässt.

$$\Delta(NAT, XN\&CI)_j = \frac{1}{w_j} * \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N \sqrt{\left(\frac{f_{XN\&CI}^{A \rightarrow Z}_{j,x,y} - f_{NAT}^{A \rightarrow Z}_{j,x,y}}{f_{XN\&CI}^{A \rightarrow Z}_{j,x,y}} \right)^2}, \quad 5.9$$

wobei $f_{XN\&CI}^{A \rightarrow Z}_{j,x,y} = \frac{CE_{XN\&CI}^Z_{j,x,y}}{CE_{j,x,y}^A}$ und $f_{NAT}^{A \rightarrow Z}_{j,x,y} = \frac{CE_{NAT}^Z_{j,x,y}}{CE_{j,x,y}^A}$ ist.

mit (w_j , $j = L, M, S$) als maximal darstellbarem Weiß, $f_{XN\&CI}^{A \rightarrow Z}_{j,x,y}$ als der durch einen exakt normalisationskompatibel und chromatizitäts-intensitäts korrigierten Beleuchtungswechsel verursachten Veränderung und $f_{NAT}^{A \rightarrow Z}_{j,x,y}$ als der durch einen natürlichen Beleuchtungswechsel verursachten Veränderung

5.2 Experiment VI

Zur Untersuchung der in Kapitel 2.5.3 erläuterten Hypothesen wird in *Experiment VI* mit folgenden Rahmenbedingungen gearbeitet. Dargestellt werden die Beleuchtungswechsel durch das in Abschnitt 5.1 erläuterte Paradigma, bei dem die Versuchsperson zwei nacheinander dargestellte Beleuchtungswechsel sieht und die Aufgabe hat, zu entscheiden, „welcher Beleuchtungswechsel mehr wie ein natürlicher Beleuchtungswechsel aussieht“. Zur Prüfung von *Hypothese IV* werden natürliche Beleuchtungswechsel exakt normalisationskompatiblen Beleuchtungswechseln gegenübergestellt. Zur Prüfung von *Hypothese V* müssen die Versuchspersonen zwischen exakt normalisationskompatibel korrigierten und exakt normalisationskompatibel und chromatizitäts-intensitäts korrigierten Beleuchtungswechseln wählen. Ergänzend werden ebenfalls exakt normalisationskompatible und chromatizitäts-intensitäts korrigierte Beleuchtungswechsel natürlichen Beleuchtungswechseln gegenübergestellt. Neben diesen zentralen Variationen des Korrekturmodus wurden weitere Faktoren unabhängig variiert, mit dem Ziel, verschiedene Abweichungsgrade zwischen den zu vergleichenden Korrekturmodi zu erreichen. Hierzu gehört die Wahl der Oberflächenreflektanzspektren.

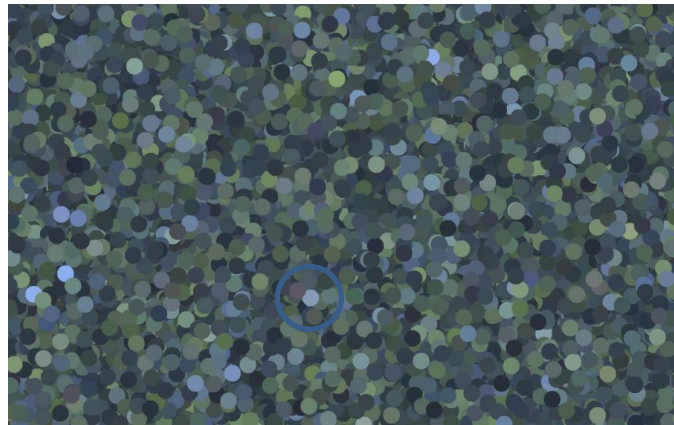
Die Reize bestehen aus Seuratbildern, setzen sich also aus einer Vielzahl kleiner Kreise (0.68° Sehwinkel) zusammen, die den gesamten Bildschirm ($84.8^\circ \times 59.4^\circ$ Sehwinkel) bedecken, sodass weder unterschiedliche noch in der Natur typische semantische Inhalte vorhanden sind (Abbildung 5.2). Die für die Reizgenerierung verwendeten Oberflächenreflektanzspektren werden aus den Hyperspektralbildern zwölf natürlicher Szenen von Ruderman et al. (1998) gewonnen. Auf Grund der Größe von 128×128 Pixeln einer solchen Fotografie stehen pro Szene 16384 Oberflächenreflektanzspekten zur Verfügung. Die Gruppierung zu Szenen wird beibehalten, sodass 12 verschiedene Sets aus Oberflächenreflektanzspektren eingesetzt werden (Anhang C.1). Zur Simulation der Beleuchtungswechsel werden drei verschiedene CIE Normbeleuchtungen eingesetzt, mit Farbtemperaturen von 4000 Kelvin, 7000 Kelvin sowie 20000 Kelvin, welche auf für ein equal energy weiß eine Luminanz von eins aufweisen und daher um den Faktor 80 skaliert wurden, da sich hieraus ein großer Gamut ergibt. Somit werden sechs Beleuchtungswechselvarianten möglich. Die geometrische Anordnung der 32768 gezeichneten Kreise pro Seuratbild wird konstant gehalten. Die Zuordnung der Chromatizitäten zu den Ellipsen wird über die Seuratbilder eines Durchgangs konstant gehalten.

Alle Stufen der unabhängigen Variablen werden exhaustiv gepaart, zudem wird die Darstellungsreihenfolge der miteinander zu vergleichenden Beleuchtungswechsel balanciert. Die zu vergleichenden Beleuchtungswechsel unterscheiden sich innerhalb eines Durchgangs nur im Hinblick auf die, für die Simulation verwendeten, Korrekturmodi. Daraus ergeben sich 3 Korrekturmodusvergleichskombinationen * 2 Darstellungsreihenfolgen * 12 Oberflächenreflektanzspektrensets * 6 Beleuchtungswechselvarianten = 432 Durchgänge.

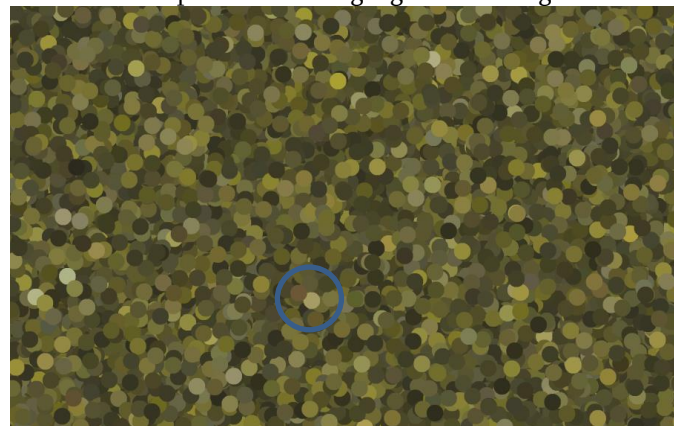
Ablauf. Die Erhebung der 432 Durchgänge wurde auf zwei Sitzungen verteilt, für welche die Teilnehmer jeweils zwischen 40 und 60 Minuten benötigten. Vor der Datenerhebung wurden die Versuchspersonen schriftlich instruiert (Anhang C.2) und hatten die Möglichkeit, Fragen zu stellen. Danach folgte eine fünfminütige Gewöhnungsphase, in der die Teilnehmer die Möglichkeit hatten, sich an die Dunkelheit zu gewöhnen. Anschließend wurde die Aufgabenstellung vom Versuchsleiter wiederholt und, um mit der Aufgabenbearbeitung vertraut zu werden, wurden vor jeder Sitzung 18 Übungsdurchgänge bearbeitet und die Teilnehmer hatten erneut die Möglichkeit, Fragen zu stellen. Anschließend bearbeiteten die Teilnehmer die 216 Durchgänge selbstständig, der Versuchsleiter verließ dazu den Raum. Da die Teilnehmer die Durchgänge selbstständig starteten, ergab sich die Möglichkeit, bei Bedarf Pausen zu

machen. Nach Abschluss der zweiten Sitzung beantworteten die Teilnehmer einen kurzen Abschlussfragebogen (vgl. Anhang C.3).

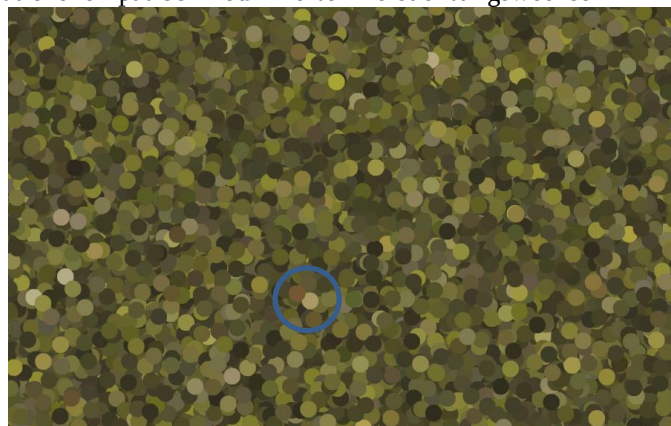
Teilnehmer. 11 Versuchspersonen (7 weibliche und 3 männliche) im Alter zwischen 18 und 38 Jahren nahmen an diesem Experiment teil. Mit Ausnahme zweier Versuchspersonen (VP 10, 11) waren allen Teilnehmern die Fragestellung und die Ziele der Untersuchung unbekannt. Alle hatten normale oder zu normal korrigierte Sehschärfe und waren nach den Ergebnissen des *Ishihara Test for Colour Blindness* (Ishihara, 1967) normal farbsichtig. Die Teilnehmer, mit Ausnahme der nicht naiven Versuchspersonen, wurden mit Versuchspersonenstunden oder 8 Euro pro Stunde belohnt.



Oberflächenreflektanzset treetop unter der Ausgangsbeleuchtung CIE 20000 Kelvin



Oberflächenreflektanzset treetop unter der Zielbeleuchtung CIE 4000 Kelvin nach einem exakt normalisationskompatibel modifizierten Beleuchtungswechsel



Oberflächenreflektanzset treetop unter der Zielbeleuchtung CIE 4000 Kelvin nach einem exakt normalisationskompatibel und chromatisitäts- intensitäts korrigierten Beleuchtungswechsel

Abbildung 5.2: Beispiel für die Stimuli in einer XN vs. $XN\&CI$ Entscheidungsaufgabe. Der Kreis dient dem leichteren Vergleich der Auswirkungen von Beleuchtungswechsel und gewählten Korrekturmodus.

5.2.1 Ergebnisse – Experiment VI

Hypothese IV formuliert die Erwartung, dass die Versuchspersonen mit zunehmender relativer Abweichung der Zapfenerregungsverhältnisse zunehmend häufiger einen exakt normalisationskompatibel simulierten Beleuchtungswechsel vor einem natürlich simulierten präferieren. Die Ergebnisse des vorliegenden Experiments sind mit dieser Erwartung nicht konform. Über alle Versuchspersonen gemittelt, schwankt die Präferenz für exakt normalisationskompatibel simulierte Beleuchtungswechsel um 0.5 (Abbildung 5.3; Anhang C.4 gibt die entsprechenden relativen Häufigkeiten sowie die Anzahl der Messungen pro Intervall wieder). In Abbildung 5.3 wird deutlich, dass lediglich die Versuchspersonen 4, 8 und 11 mit zunehmender relativer Abweichung der Zapfenerregungsverhältnisse exakt normalisationskompatibel simulierte Beleuchtungswechsel tendenziell bevorzugen. Dass diese Ausprägung als gering einzuschätzen ist, ergibt sich aus der Überlegung, dass die zu erwartende Schwelle bei einer Präferenz von 0.75³⁹ liegt. Um die Bedeutung dieses Ergebnisses zu interpretieren, ist es notwendig, die relative Abweichung der Zapfenerregungsverhältnisse einzuschätzen. Im vorliegenden Experiment erstrecken sich die relativen Abweichungen zwischen 0.0077 und 0.0268 (mit Intervallstützpunkten zwischen 0.005 und 0.025), wohingegen die von Nascimento und Foster (1997) erzielten Abweichungen und die somit gewählten Intervalle zwischen 0 und 0.1 liegen (bei einer Intervallbreite von 0.0125). Somit ist die Ausprägung dieser Werte durchaus mit den von Nascimento und Foster präsentierten Ergebnisdaten vergleichbar, da der in *Experiment VI* untersuchte Abweichungsbereich nur einen sehr kleinen Ausschnitt des von Nascimento und Foster untersuchten Bereichs widerspiegelt, und auch bei diesen Autoren in diesem Bereich nicht auf eine eindeutige Präferenz von exakt normalisationskompatibel simulierten vor natürlich simulierten Beleuchtungswechseln geschlossen werden kann.

Beim direkten Vergleich der Veränderungen der Oberflächen unter verschiedenen Simulationsbedingungen ($\Delta(NAT, XN)$) zeigt sich wie erwartet das gleiche Bild. Wie bei der Betrachtung des ersten und zweiten Intervalls (Abbildung 5.4) deutlich wird, ist bei einigen Versuchspersonen eine leicht ansteigende Tendenz zu erkennen, die jedoch insgesamt dicht um 0.5 liegen. Das dargestellte dritte Intervall ist in diesem Zusammenhang nicht zu interpretieren, da den berechneten relativen Häufigkeiten lediglich 4 Urteile pro Versuchsperson zu Grunde liegen.

³⁹ Legt man eine psychometrische Funktion mit logistischer Form zu Grunde, so berechnet sich die Schwelle durch $\gamma + \frac{(1-\gamma)}{2}$ wobei γ die Ratewahrscheinlichkeit repräsentiert, die sich durch die Wahrscheinlichkeit der zufälligen Auswahl einer Antwortalternative schätzen lässt. Bei zwei Antwortalternativen liegt γ bei 0.5.

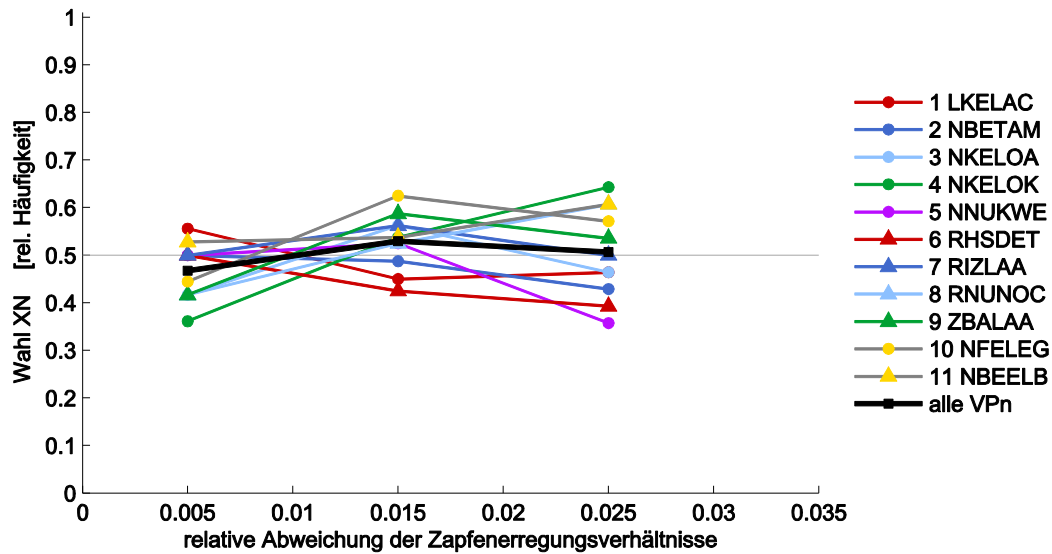


Abbildung 5.3: Relative Häufigkeiten der Präferenz von exakt normalisationskompatibel korrigierten Beleuchtungswechseln vor natürlichen Beleuchtungswechseln in Abhängigkeit von der relativen Abweichung der Zapfenerregungsverhältnisse (ΔCER). Die an die Gegebenheiten der Stimuli angepasste Berechnung der relativen Abweichung der Zapfenerregungsverhältnisse erfolgt in Anlehnung an die Berechnungsweise von Nascimento und Foster (1997). Die Intervalle wurden mit einer festen Intervallbreite von 0.01 vom Ursprung ausgehend gebildet.

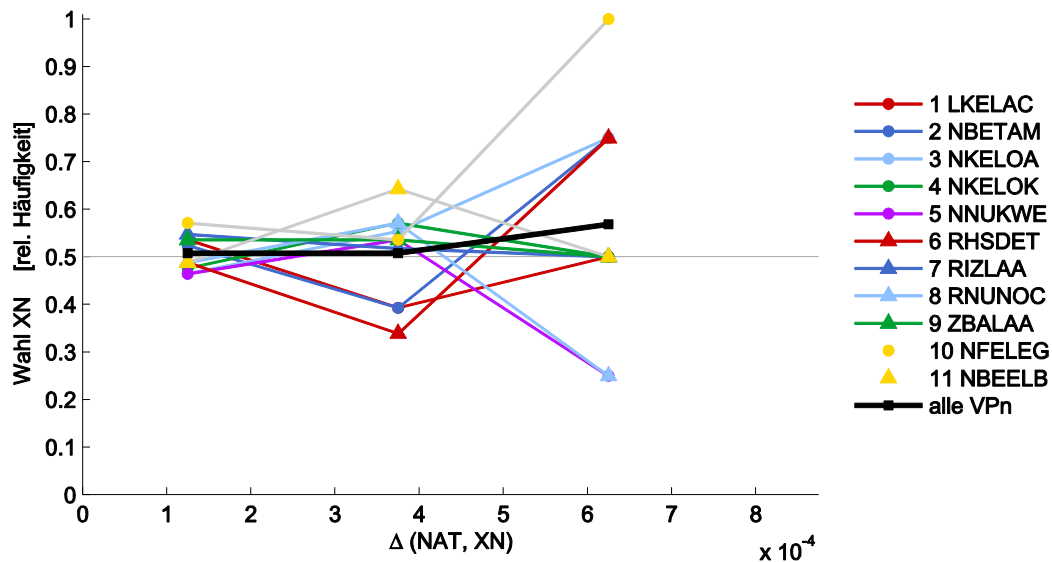


Abbildung 5.4: Relative Häufigkeit der Bevorzugung von exakt normalisationskompatiblen Beleuchtungswechseln vor natürlichen Beleuchtungswechseln in Relation zum Grad der Abweichung $\Delta(NAT, XN)$ dieser Bedingungen. Dargestellt sind Intervalle mit einer festen Intervallbreite von 0.00025.

In *Hypothese V* wird die Vorhersage formuliert, dass ein exakt normalisationskompatibel und chromatizitäts-intensitäts korrigiert simulierter Beleuchtungswechsel einem exakt normalisationskompatibel simulierten Beleuchtungswechsel mit zunehmender Abweichung der Simulationen voneinander zunehmend bevorzugt wird. Zur Berechnung der Abweichung der beiden Vorhersagen wird $\Delta(XN\&CI, XN)$ in Relation zur relativen Häufigkeit der Präferenz von $XN\&CI$ verwendet, Erläuterungen zur Berechnung des Abweichungsmaßes finden sich in Abschnitt 5.1.2. Abbildung 5.5 zeigt die Ergebnisse dieses Vergleichs. Es zeigt sich eine leichte, jedoch nicht als bedeutsam einzustufende Präferenz für die exakt normalisationskompatibel und chromatizitäts-intensitäts korrigiert simulierten Beleuchtungswechsel. Die beiden Intervalle sind mit 96 und 48 Urteilen pro Versuchsperson ausreichend belegt (vgl. Anhang C.4).

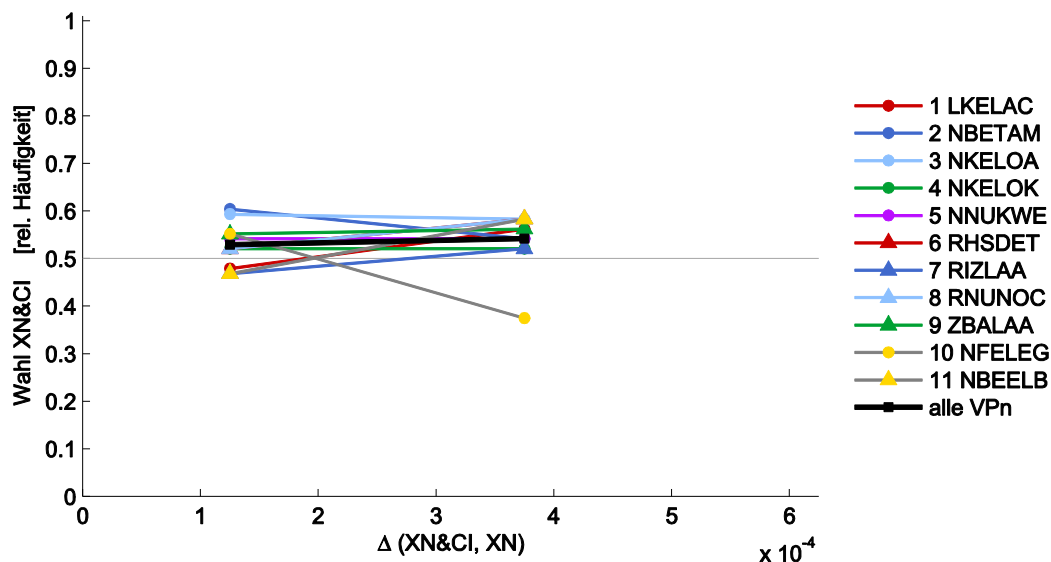


Abbildung 5.5: Relative Häufigkeit der Bevorzugung von exakt normalisationskompatiblen und chromatizitäts-intensitäts korrigierten Beleuchtungswechseln vor exakt normalisationskompatiblen Beleuchtungswechseln, in Relation zum Grad der Abweichung $\Delta(XN\&CI, XN)$ dieser Bedingungen. Feste Intervallbreite 0.00025.

Der Vergleich von exakt normalisationskompatibel und chromatizitäts-intensitäts korrigiert simulierten Beleuchtungswechseln mit natürlich simulierten Beleuchtungswechseln lässt nur sehr kleine Unterschiede in den Abweichungen der Vorhersagen erwarten. Dementsprechend wurden die Intervalle deutlich verschmälert und mit einer Breite von 0.000125 festgelegt. Hieraus ergeben sich für die untersuchten Beleuchtungswechsel bei aus natürlichen Szenen gewonnenen Oberflächen zwei Intervalle, wobei eines mit 126 Urteilen pro Versuchsperson belegt ist, das Intervall über die größeren Abweichungen mit 18. Die über alle Versuchspersonen berechneten relativen Häufigkeiten zeigen wiederum Werte im zufällig zu erwartenden Be-

reich von 0.5 (vgl. Abbildung 5.6). Hingegen zeigen sich für das Intervall mit den größeren Abweichungen starke Unterschiede zwischen den Versuchspersonen.

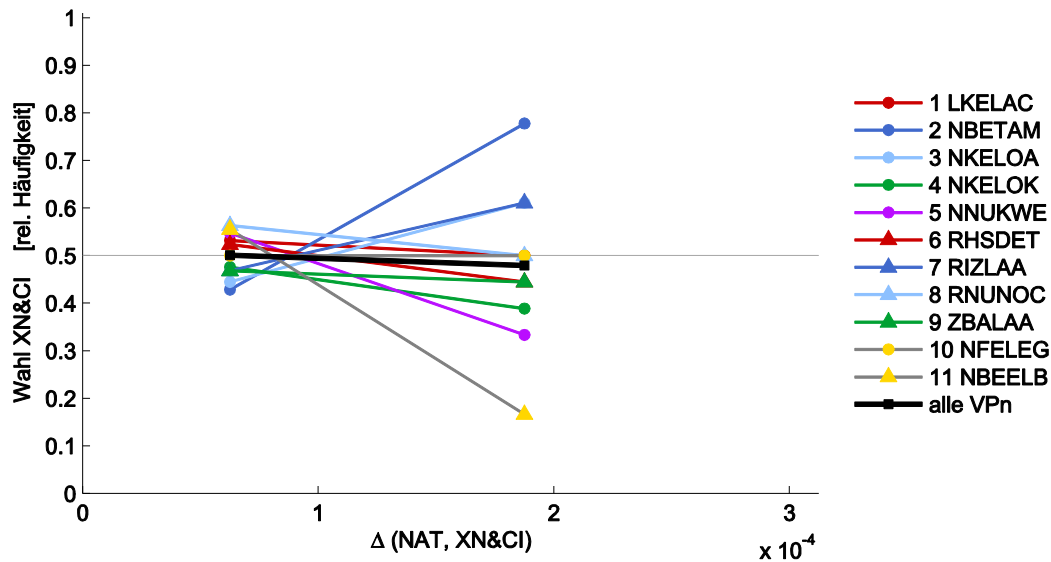


Abbildung 5.6: Relative Häufigkeit der Bevorzugung von exakt normalisationskompatiblen und chromtizitäts-intensitäts korrigierten Beleuchtungswechseln vor natürlichen Beleuchtungswechseln, in Relation zum Grad der Abweichung $\Delta(NAT, XN\&CI)$ dieser Bedingungen. Feste Intervallbreite 0.000125.

Auswertung des abschließenden Fragebogens. Der abschließende Fragebogen beinhaltet zwei zentrale Fragen, deren Antworten erwartungsgemäß korrelieren sollten. Zum einen wurde die Frage nach der Definition eines natürlichen Beleuchtungswechsels gestellt, zum anderen wurde um eine Neuformulierung der Aufgabenstellung - denjenigen Beleuchtungswechsel auszuwählen, der mehr wie ein natürlicher Beleuchtungswechsel wirkt - gebeten, sodass die neuformulierte Aufgabenstellung präzise das individuelle Verständnis der Aufgabe beschreibt. Der exakte Wortlaut der Fragen und Antworten findet sich in Anhang C.5.

Die Antworten der Versuchspersonen lassen sich in drei Gruppen aufteilen: Zum einen nennt die erste Gruppe von Versuchspersonen den natürlichen Anschein als zentrales Kriterium, die Beleuchtungswechsel sollen „ähnlich der Sonne“ sein (VP 3), wie unter „Tageslicht“ (VP 5, VP 9) sein, einer Situation, wie man es aus der Natur kennt gleichen (VP 6) oder der Wechsel dergestalt sein, dass er natürlichem Licht gleicht (VP 9).

Die zweite Gruppe lässt sich über die Fokussierung auf die Kohärenz der Veränderung beschreiben. So rücken diese Versuchspersonen vergleichbare Veränderungen aller Farben im Display (VP 1), der „harmonische“ Wechsel oder der „unauffällige Unter-

schied“ ohne große „Farbwechsel“ (VP 7) oder „Farbunterschiede“ (VP 8) ins Zentrum. Versuchsperson 2 hingegen versteht unter einem natürlichen Beleuchtungswechsel, „dass sich verschiedene Farben auch unterschiedlich stark in Helligkeit und Sättigung [...] verändern“. Andernfalls entstünde „der Eindruck, dass eine Art Filter wirkt“.

5.2.2 Diskussion – Experiment VI

Die Erwartung, dass mit zunehmender Abweichung eines exakt normalisationskompatibel simulierten Beleuchtungswechsels von einem natürlichen Beleuchtungswechsel die Präferenz der Versuchspersonen für den exakt normalisationskompatibel simulierten Beleuchtungswechsel ansteigt, kann in *Experiment VI* nicht repliziert werden. Vergleicht man jedoch die mit diesem Stimulusset erzeugten relativen Abweichungen der Zapfenerregungsverhältnisse mit den von Nascimento und Foster (1997) verwendeten, zeigt sich, dass die in *Experiment VI* erreichten Abweichungen der Zapfenerregungsverhältnisse vergleichsweise gering sind. Daher sollte bei einem erneuten Replikationsversuch in *Experiment VII* darauf geachtet werden, dass ausreichend große Abweichungen der Zapfenerregungsverhältnisse verwendet werden.

Andererseits wirft dieser Diskussionspunkt auch Fragen der ökologischen Validität des experimentellen Paradigmas auf. Da die verwendeten Stimuli aus hyperspektralen Fotografien natürlicher Szenen entnommener Oberflächen bestehen, wäre zu erwarten, dass sich auch in diesem Bereich schon eine deutliche Präferenz zeigt, wenn das verwendete Maß ein geeignetes Maß für die Beurteilung visueller Prozesse ist.

Für das folgende Experiment empfiehlt es sich somit die Urteilszahl zu erhöhen sowie die Breite der Abweichungen der Zapfenerregungsverhältnisse auszuweiten, um die Ergebnisse von Nascimento und Foster (1997) in einer Replikation erneut zu prüfen.

Analog verhält es sich mit den Ergebnissen zur Untersuchung von *Hypothese V*. Auch hier lassen die Ergebnisse keine klare Präferenz für einen der Korrekturmodi erkennen. Die Unterschiede zwischen den beiden miteinander verglichenen Beleuchtungswechselsimulationen sind sehr klein. Als pragmatischer Schritt sollte auch hier versucht werden Beleuchtungswechsel und Oberflächenkombinationen zu finden, die zu größeren Unterschieden führen.

Erwartungsgemäß noch extrem viel kleiner sind die Unterschiede zwischen einem exakt normalisationskompatibel und chromatisitäts-intensitäts korrigiert simulierten Beleuchtungswechsel (*XN&CI*) und einem natürlich simulierten Beleuchtungswechsel (*NAT*). Da der Vergleich dieser beiden Beleuchtungswechselsimulationsvarianten nicht von primärer Bedeutung für die Untersuchung der oben aufgeworfenen Frage-

stellungen (Kapitel 2.5) ist, wird im Folgenden von einer weiteren Gegenüberstellung dieser beiden Korrekturmodi abgesehen.

5.3 Experiment VII

Zur Klärung der in Kapitel 2.5 angeführten Hypothesen legt die Diskussion der Ergebnisse von *Experiment VI* nahe, dieses Experiment mit Hilfe anderer zu größeren Abweichungen von der exakt normalisationskompatiblen Bedingung führender Oberflächenreflektanzen zu wiederholen. Als Stimulusbasis für die Oberflächenreflektanzspektren wird ein Reflektanzset von Brown (2003) verwendet, das Reflektanzspektren von Blumen, Früchten und Blättern enthält. Damit wird eine zentrale Annäherung an die von Nascimento und Foster (1997) verwendete Stimulusbasis erreicht und dennoch das Kriterium der natürlichen Oberflächenreflektanzspektren gewahrt.

Versuchsplan. Die in diesem Experiment einander gegenübergestellten Korrekturmodi sind zum einen exakt normalisationskompatible Beleuchtungswechsel (XN), die mit natürlichen Beleuchtungswechseln (NAT) oder mit exakt normalisationskompatiblen und chromatisitäts-intensitäts korrigierten (XN&CI) Beleuchtungswechseln verglichen werden (Tabelle 5.1). Dabei wird die Position, an der die zu vergleichenden Beleuchtungswechsel präsentiert werden, balanciert.

Stimuli. Als Stimuli werden analog zu Experiment VI Seuratbilder erzeugt (Abbildung 5.7). Als Oberflächenreflektanzspektren dienen durch spektrophotometrische Messungen gewonnene Spektren von Blumen, Früchten und Bäumen (R. O. Brown, 2003). Diese Gruppierung der Oberflächenreflektanzspektren wird beibehalten, wobei die Anzahl der in einer Gruppe enthaltenen Oberflächenreflektanzen zwischen den drei Gruppen leicht variiert (vgl. Tabelle 5.1). Um die Vergleichbarkeit mit *Experiment VI* weiter zu erhöhen, werden alle im Gamut darstellbaren Oberflächen so skaliert, dass ihre mittlere Luminanz der mittleren Luminanz aller Oberflächenreflektanzspektren der Rudermanszenen (Ruderman et al., 1998) entspricht. Anschließend wird die Skalierung berechnet. Als Beleuchtungen werden wie in *Experiment VI* Beleuchtungen mit einer Farbtemperatur von 4000 Kelvin, 7000 Kelvin und 20000 Kelvin verwendet, deren Luminanz für ein equal energy weiß bei 80 cd/m² liegt.

Um die Präzision der Messung zu erhöhen, wird die Anzahl der gemessenen Datenpunkte pro Zapfenerregungsquotientenintervall (Intervallgröße 0.01) auf 40 Messungen gelegt. Deshalb wird neben den Korrekturmodi, den Beleuchtungswechseln, den Oberflächenreflektanzsets auch die geometrische Anordnung der Oberflächen zwischen den Durchgängen variiert. Hierzu wurden für jedes Oberflächenset zehn zufällig gezogene Varianten erstellt. Die Anzahl der Kreise pro Bild soll der in *Experiment*

VI möglichst ähnlich sein und sicherstellen, dass der gesamte Bildschirm mit Kreisen bedeckt ist. Zudem soll jede Oberflächenfarbe gleich oft gezeichnet werden. Daher wurde für jedes Oberflächenset das ganzzahlige Vielfache als Kreisanzahl gewählt, das der Kreisanzahl in *Experiment VI* am nächsten kommt.

Damit ergeben sich für dieses Experiment 720 Durchgänge (2 Korrekturmodivergleiche * 2 Darstellungspositionen * 6 Beleuchtungswechsel * 3 Oberflächenreflektanzensets * 10 geometrische Anordnungsvarianten). Die Erhebung der Durchgänge wird auf drei circa einstündige Sitzungen verteilt, sodass eine konzentrierte Bearbeitung möglich ist. Dabei werden die Durchgänge so auf die Sitzungen verteilt, dass die Stufen der Bedingungen Korrekturmodusvergleich, Beleuchtungswechsel und Oberflächenreflektanzset in allen Sitzungen gleich häufig vertreten waren. Innerhalb einer Sitzung war die Reihenfolge der Durchgänge randomisiert, wobei kontrolliert wurde, dass sich die Durchgänge einer Bedingung nicht häufen und das erwartete Antwortmuster nicht mehr als 6 mal die gleiche Reaktion beinhaltet, um bei den Teilnehmern einen Wechsel des Beurteilungsschemas aufgrund der Häufung einer Reaktionstaste zu vermeiden.

Versuchspersonen. An diesem Experiment nahmen 6 weibliche Personen im Alter zwischen 20 und 29 Jahren teil, davon waren fünf die Ziele und die Inhalte des Experiments unbekannt. Die sechste war die Autorin (VP 6). Alle Teilnehmer hatten nach eigenen Angaben normale oder zu normal korrigierte Sehschärfe und normale Farbsichtigkeit, die mit dem *Ishihara Tests for Color Blindness* (Ishihara, 1967) geprüft wurde.

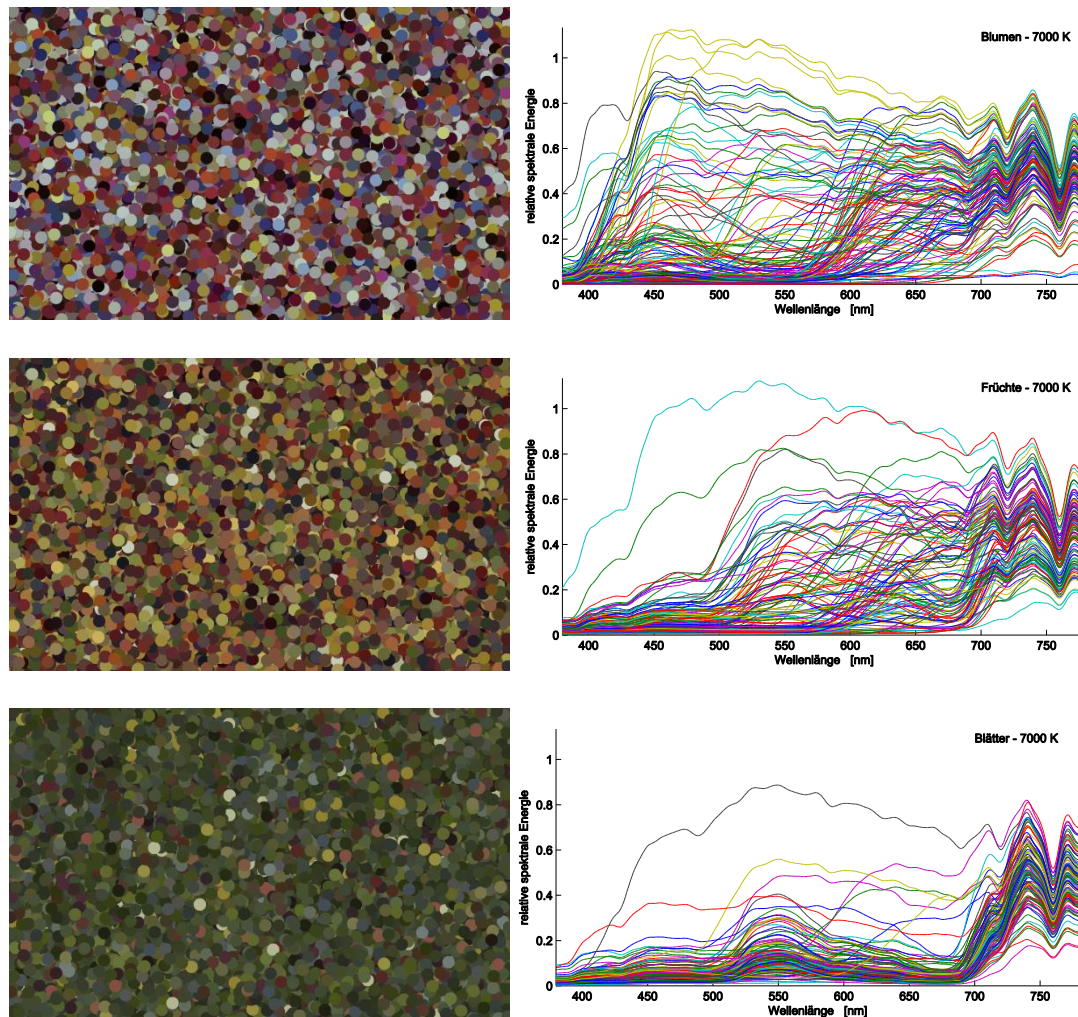


Abbildung 5.7: Beispiel für die in *Experiment VII* verwendeten Stimuli. Auf der linken Seite ist jeweils ein Stimulusbeispiel für Blumen, Früchte und Blätter jeweils unter einer natürlich simulierten CIE Tageslichtbeleuchtung von 7000 Kelvin. Rechts ist das reflektierte Licht der in die Stimulusgestaltung eingehenden Oberflächenreflektanzspektren von Blumen, Früchten und Bäumen (R. O. Brown, 2003) unter der CIE Tageslichtbeleuchtung von 7000 Kelvin abgebildet.

5.3.1 Ergebnisse – Experiment VII

Berechnung der Intervalle. Berechnet man die Abweichung (ΔCER), für einen Beleuchtungswechsel und eine Szene, und die Abweichung (ΔCER) für den Beleuchtungswechsel in die genau umgekehrte Richtung, so stellt man fest, dass diese nah beieinander liegen. Dies ist bei der Berechnung von $\Delta(XN\&CI, XN)$ und bei $\Delta(XN, NAT)$ nicht mehr der Fall. Insbesondere bei großen Abweichungen von XN von NAT bzw. $XN\&CI$ unterscheiden sich die Abweichungswerte zweier Beleuchtungswechselrichtungen einer Szene sehr stark. Dies ist beispielsweise beim Vergleich von Blumen beim Beleuchtungswechsel von 4000 Kelvin zu 7000 Kelvin im Vergleich zum Beleuchtungswechsel von 7000 Kelvin zu 4000 Kelvin. Dadurch ergeben sich für diese Methoden der Abweichungsberechnung unterschiedlich stark besetzte Intervalle.

Abbildung 5.8 zeigt die Ergebnisse für den Vergleich von exakt normalisationskompatibel simulierten Beleuchtungswechseln mit natürlichen Beleuchtungswechseln in Abhängigkeit von der relativen Abweichung der Zapfenerregungsverhältnisse (ΔCER). Die über alle Versuchspersonen gemittelte relative Häufigkeit für die Präferenz von exakt normalisationskompatiblen Beleuchtungswechsel liegt konstant über 0.5, übertritt die Schwelle von 75% jedoch nicht. Mit zunehmender relativer Abweichung der Zapfenerregungsverhältnisse nimmt die über alle Teilnehmer berechnete Präferenz für exakt normalisationskompatibel simulierte Beleuchtungswechsel zu. Die Betrachtung der Ergebnisse der einzelnen Versuchspersonen zeigt, dass die Versuchspersonen 2 und 3 und tendenziell auch Versuchsperson 1 eine deutliche Präferenz für exakt normalisationskompatibel simulierte Beleuchtungswechsel zeigen. Hingegen zeigen die Versuchspersonen 4, 5 und in der Tendenz schwächer ausgeprägt auch Versuchsperson 6 deutlich ambivalentere Ergebnisse. So schwankt die Präferenz dieser Versuchspersonen um 0.5 und drückt somit keinesfalls eine systematische Präferenz aus.

Die in diesem Experiment eingesetzten Stimuli führen zu einer großen Breite relativer Abweichungen der Zapfenerregungsverhältnisse, welche die bei Nascimento und Foster (1997) maximal berichteten mit einem Wert von 0.1 überschreiten. Während bei Nascimento und Foster die maximale Präferenz für exakt normalisationskompatibel simulierte Beleuchtungswechsel bei maximal gemessenen Abweichungen der Zapfenerregungsverhältnisse um 90 Prozent liegt, liegt sie im vorliegenden Experiment deutlich tiefer (Anhang C.6, für die exakten Werte).

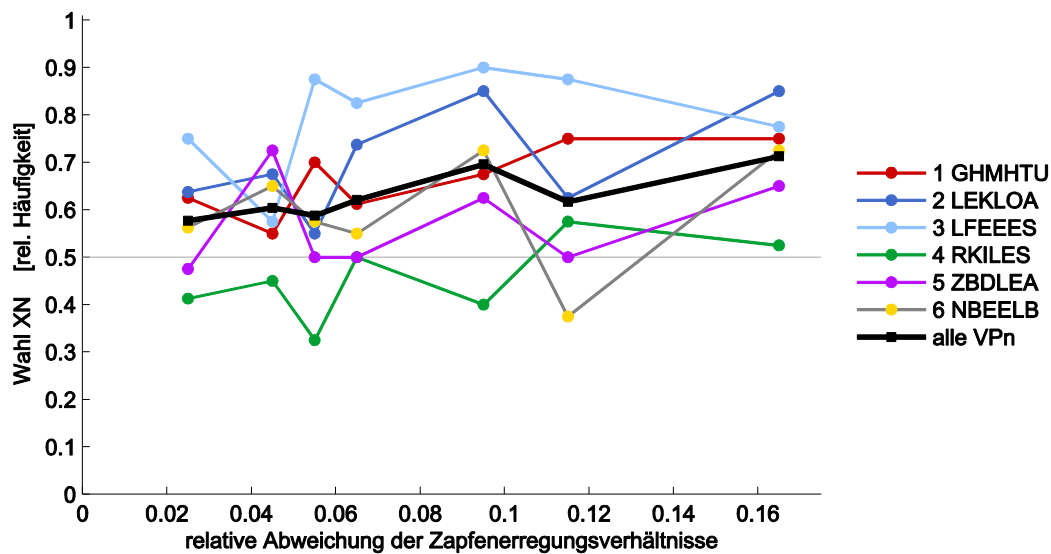


Abbildung 5.8: Ergebnisse *Experiment VII*. Relative Häufigkeiten der Präferenz von exakt normalisationskompatibel korrigierten Beleuchtungswechseln vor natürlichen Beleuchtungswechseln in Abhängigkeit von der relativen Abweichung der Zapfenerregungsverhältnisse ($\Delta(CER)$, in Anlehnung an Nascimento und Foster (1997); feste Intervallbreite: 0.01).

Abbildung 5.9 stellt dieselben Daten in Relation zum Abweichungsmaß $\Delta(NAT, XN)$ dar. Auch bei dieser unmittelbaren Berechnung der Abweichungen der simulierten Beleuchtungswechsel voneinander zeigt sich ein mit den Ergebnissen in Abbildung 5.8 vergleichbares Bild. Alle Messpunkte basieren auf mindestens 20 Urteilen pro Versuchsperson. für die exakten Werte ist Anhang C.7 zu konsultieren.

Der zur Prüfung von *Hypothese V* erhobene Vergleich zwischen exakt normalisationskompatibel und chromatizitäts-intensitäts korrigiert simulierten Beleuchtungswechseln und exakt normalisationskompatibel simulierten Beleuchtungswechseln zeigt im Gegensatz zur in *Hypothese V* formulierten Erwartung keine Präferenz für exakt normalisationskompatibel und chromatizitäts-intensitäts korrigiert simulierte Beleuchtungswechsel (Abbildung 5.10). Analog zu den Ergebnissen in Abbildung 5.9 wird auch hier eine starke Präferenz der exakt normalisationskompatibel simulierten Beleuchtungswechsel durch die Versuchspersonen 2, 3 und in weniger ausgeprägter Form Versuchsperson 1 deutlich, während die Versuchspersonen 4, 5 und 6 um die 50% Marke streuen, wie auch bei zufälliger Wahl eines der beiden Beleuchtungswechsel zu erwarten wäre. Die hier dargestellten Intervalle sind unterschiedlich stark besetzt, wobei jedes einzelne Intervall mindestens 20 Urteile pro Versuchsperson repräsentiert und damit als ausreichend besetzt angesehen wird (Anhang C.6).

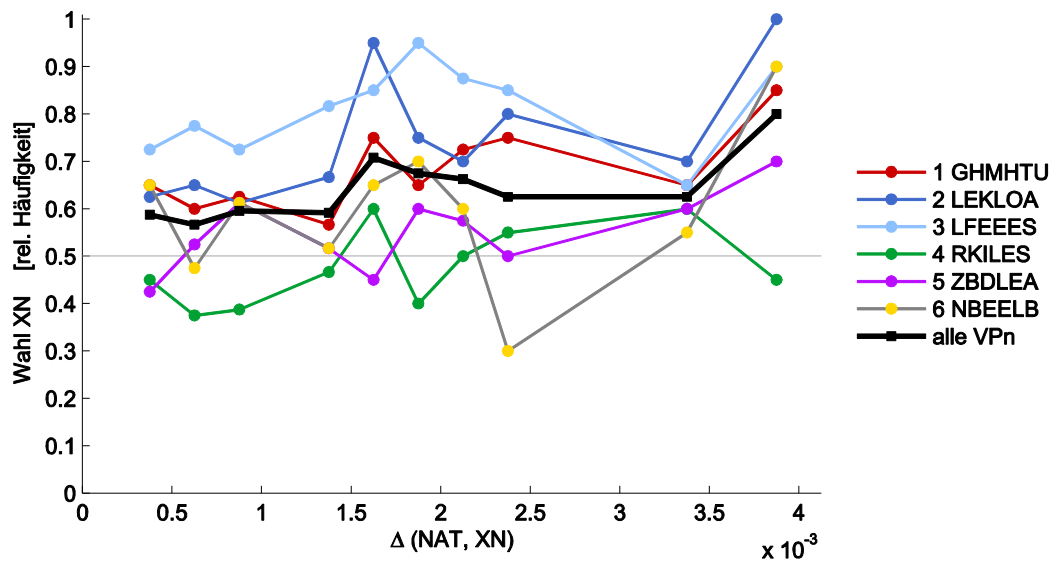


Abbildung 5.9: Ergebnisse *Experiment VII*. Relative Häufigkeit der Bevorzugung von exakt normalisationskompatiblen Beleuchtungswechseln vor natürlichen Beleuchtungswechseln in Relation zum Grad der Abweichung $\Delta(NAT, XN)$ dieser Bedingungen. Feste Intervallbreite 0.00025.

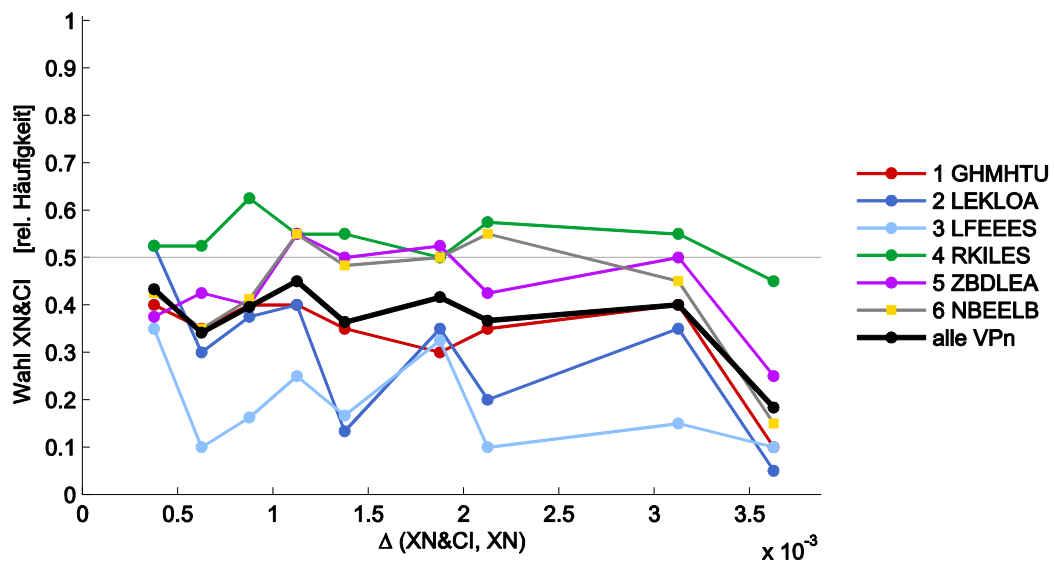


Abbildung 5.10: Ergebnisse *Experiment VII*. Relative Häufigkeit der Bevorzugung von exakt normalisationskompatiblen und chromazitäts-intensitäts korrigierten Beleuchtungswechseln vor exakt normalisationskompatiblen Beleuchtungswechseln, in Relation zum Grad der Abweichung $\Delta(XN\&CI, XN)$ dieser Bedingungen. Feste Intervallbreite 0.00025.

Auswertung der strukturierten Interviews. In einem strukturierten Interview, das im letzten Schritt der Datenerhebung geführt wurde, wurden die Teilnehmer nach ihrem Verständnis der Aufgabe befragt. Die exakte Formulierung der Fragestellung sowie die durch den Versuchsleiter protokollierten Antworten der Versuchsteilnehmer sind in Anhang C.7 nachzulesen. Da der Versuchsleiterin Fragestellung und Ziel der Untersuchung bekannt waren, werden ihre Angaben nicht in die Auswertung einbezogen.

Auf die Frage, was die Teilnehmer unter einem natürlichen Beleuchtungswechsel verstehen, berichteten die Teilnehmer oft von einem Verständnis als nicht künstlich (VP 1, 3) oder im Sinne von in der Natur vorkommend (VP 3, 5). Versuchsperson 4 beschreibt natürliche Beleuchtungswechsel als „nicht so neonartig“ und „nicht so krass“. Versuchsperson 2 beschreibt einen natürlichen Beleuchtungswechsel als weichen Übergang. Drei Versuchspersonen merken darüber hinaus in einem Beispiel an, dass Sie einzelne sich stärker verändernde Farbscheiben als unnatürlich empfinden (Versuchsperson 1, 2, 5). Versuchsperson 1 beschreibt dies folgendermaßen: „nach einer Weile hatte ich gesehen, dass sich einige Punkte anders verändern als andere, das fand ich unnatürlich. Eine natürliche Veränderung ist gleichmäßig“.

Versuchsperson 4 beschreibt teilweise eine durch die Stimuli hervorgerufene Tiefenwirkung, die anderen Versuchspersonen (1, 2, 3, 5) beschreiben die Stimuli als flach oder flach übereinanderliegende dünne Scheibchen.

5.3.2 Diskussion – Experiment VII

Die veränderte Wahl der Stimuli ermöglichte es, Beleuchtungswechsel darzubieten, deren relative Abweichung der Zapfenerregungsverhältnisse ($\Delta(CER)$) die von Nascimento und Foster (1997) verwendeten umfassen und auch darüber hinausgehen. In der Arbeit von Nascimento und Foster wurden relative Abweichungen der Zapfenerregungsverhältnisse zwischen 0 und 0.1 untersucht, im hier vorliegenden Experiment wurden Beleuchtungswechsel mit relativen Abweichungen der Zapfenerregungsverhältnisse zwischen 0.02 und 0.17 dargeboten. Somit wäre zu erwarten, dass eine mit den Daten von Nascimento und Foster vergleichbare Zunahme der Präferenz für exakt normalisationskompatibel korrigierte Beleuchtungswechsel vor natürlich simulierten Beleuchtungswechseln mit zunehmender relativer Abweichung der Zapfenerregungsverhältnisse vorliegt. Die im Experiment von Nascimento und Foster aufgetretene Zunahme der Präferenz für exakt normalisationskompatibel simulierte Beleuchtungswechsel vor natürlich simulierten Beleuchtungswechseln, die mit zunehmender Abweichung der Zapfenerregungsverhältnisse auf eine Präferenzrate von ca. 90 % ansteigt, tritt in *Experiment VII* jedoch nicht auf. Die über alle Versuchspersonen zusammengefassten Ergebnisse zeigen in *Experiment VII* mit zunehmender relativer

Abweichung der Zapfenerregungsverhältnisse deskriptiv eine leichte Zunahme der Präferenz von exakt normalisationskompatibel korrigierten Beleuchtungswechseln vor natürlich simulierten Beleuchtungswechseln, auch wenn diese nicht über die Grenze des Unsicherheitsbereichs hinausgeht, weshalb man an dieser Stelle nicht von einer Replikation der Ergebnisse von Nascimento und Foster sprechen kann.

Im Vergleich zu *Experiment VI* wurde in *Experiment VII* die Zahl der Urteile pro Intervall auf mindestens 40 Urteile pro Person und Intervall erhöht. Da Nascimento und Foster (1997) mit 50 Urteilen pro Intervall arbeiteten, ist nicht von einer zu geringen Anzahl von Urteilen bei der Messung als Grund für die von Nascimento und Foster abweichende Form und Ausprägung der Funktion auszugehen.

Ein zentraler Unterschied zwischen dem Experiment von Nascimento und Foster (1997) und *Experiment VII* liegt in den Komplexität und Größe der verwendeten Stimuli. Möglicherweise liegt hier ein Grund für die nicht gelungene Replikation. Daher wird dieser Aspekt in *Experiment VIII* berücksichtigt werden.

Des Weiteren zeigen die Ergebnisse in *Experiment VII* deutliche Unterschiede zwischen den Versuchspersonen im Hinblick auf den Grad der Bevorzugung von exakt normalisationskompatiblen Beleuchtungswechseln vor natürlichen Beleuchtungswechseln. Dies lässt die Vermutung zu, dass die Versuchspersonen mit unterschiedlichen Strategien arbeiteten.

Im Hinblick auf die *Hypothese V*, dass exakt normalisationskompatibel und chromatisitätsintensitätskorrigierte Beleuchtungswechsel vor ausschließlich exakt normalisationskompatibel korrigierten Beleuchtungswechseln bevorzugt würden, lässt sich keine Bestätigung finden. Im Gegenteil, auch bei diesem Vergleich zeigt sich beim Zusammenfassen aller Versuchspersonen eine leichte, wenn auch nicht als überzufällig zu kategorisierende Tendenz zur Präferenz für exakt normalisationskompatibel korrigierte Beleuchtungswechsel. Betrachtet man jedoch die Daten der einzelnen Versuchspersonen, so wird deutlich, dass dieses Tendenz - abgesehen vom Intervall das die größten Abweichungen zusammenfasst - hauptsächlich auf den Daten der selben drei Versuchspersonen (VP 1, 2, 3) beruht wie beim Vergleich von exakt normalisationskompatibel korrigierten Beleuchtungswechseln mit natürlichen Beleuchtungswechseln. Festzuhalten bleibt, dass sich starke Unterschiede zwischen den Versuchspersonen zeigen.

5.4 Experiment VIII

Die Ergebnisse von *Experiment VII* zeigen eine tendenzielle Bevorzugung von exakt normalisationskompensiert modifizierten Beleuchtungswechseln (*XN*) vor natürlichen Beleuchtungswechseln (*NAT*). Jedoch ist die Ausprägung der Bevorzugung von *XN* vor *NAT* deutlich geringer ausgeprägt als in den von Nascimento und Foster (1997) präsentierten Daten. Zudem wird in den Ergebnissen von *Experiment VII* deutlich, dass die Werte der einzelnen Probanden sehr stark streuen. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Experimenten liegt in der Komplexität der Stimuli. Daher wird *Experiment VIII* stärker an das Experiment von Nascimento und Foster angelehnt, in dem ebenfalls 49 quadratisch angeordnete Oberflächen als Stimuli dienen.

Stimuli. Wie in *Experiment VII* wird auch hier der Korrekturmodus *XN* jeweils mit den Korrekturmodi *NAT* und *XN&CI* verglichen. Das allgemeine Untersuchungsparadigma wird auch in diesem Experiment eingesetzt und daher die Darstellungsposition der zu vergleichenden Korrekturmodi balanciert. Ein Stimulus besteht aus 49 quadratischen Oberflächen, die in einem Quadrat der Größe $6^\circ \times 6^\circ$ Sehwinkel angeordnet sind und vor einem dunklen Hintergrund mittig auf dem Bildschirm erschienen. Die 49 verschiedenen Farben wurden aus dem gesamten darstellbaren Oberflächenset von (R. O. Brown, 2003) zufällig gezogen (zur Luminanzskalierung des Oberflächensets vergleiche Kapitel 5.3). Für die Beleuchtungswechsel werden alle Kombinationsmöglichkeiten zwischen natürlichen Beleuchtungen von 4000 Kelvin, 7000 Kelvin und 20000 Kelvin gebildet. Um die Vergleichbarkeit mit *Experiment VII* zu maximieren, werden die dort verwendeten Intervalle der Abweichung von den exakten Zapfenerregungsverhältnissen übernommen. Somit ergeben sich zehn Intervalle der Größe 0.01. Um die Vielfalt zu erhöhen, werden für jede der sechs Beleuchtungswechselrichtungen vier Oberflächensets gesucht, die dann zu einer dem Intervallbereich entsprechenden Abweichung der Zapfenerregungsverhältnisse führen. Im Optimalfall ergeben sich somit 6 Beleuchtungswechselrichtungen, die für alle zehn Intervalle mit jeweils vier Oberflächenfarbensets kombiniert werden, nach Balance der Darstellungsposition und der Erweiterung auf den zweiten Korrekturmodivergleich führt dies zu 960 Durchgängen. Da jedoch die für den Beleuchtungswechsel ausgewählte Kombination der Beleuchtung mit dem Grad der Abweichung kovariiert, ist eine vollständige Zuordnung zu jedem Abweichungsgrad nicht möglich. Generell ist es so, dass der Beleuchtungswechsel zwischen 7000 und 20000 Kelvin gemeinsam mit den zufällig gezogenen und angeordneten Oberflächensets Abweichungen der Zapfenerregungsverhältnisse im geringen Bereich (Abweichung zwischen 0.04 und $<.08$), Beleuchtungswechsel zwischen 4000 Kelvin und 7000 Kelvin zu Abweichungen im mittleren Bereich ($.05$; $<.11$) und Beleuchtungswechsel zwischen 4000 Kelvin und

20000 Kelvin zu größeren Abweichungen (0.09; <.17) führen. Wenn daher Abweichungsgrade nicht ausreichend aus Beleuchtungswechseln eines Typs generiert werden konnten, wurde die fehlende Zahl durch Beleuchtungswechsel eines anderen Typs ergänzt. Die Durchgänge wurden balanciert auf vier Sitzungen verteilt, wobei durch händische Kontrolle zu große Häufungen innerhalb der direkten Reihenfolge vermieden wurden.

Versuchspersonen. An diesem Experiment nahmen eine männliche und fünf weibliche Versuchspersonen im Alter zwischen 21 und 30 Jahren teil, davon war eine die Autorin (VP 6), die anderen Versuchspersonen waren hinsichtlich der Hintergründe des Experiments naiv. Alle Versuchspersonen hatten normale oder nach eigenen Angaben zu normal korrigierte Sehschärfe und waren nach den Ergebnissen des *Ishihara Tests for Colour Blindness* (Ishihara, 1967) normal farbsichtig.

5.4.1 Ergebnisse – Experiment VIII

Durch die quadratische Anordnung der Stimulusfarben ergibt sich die Möglichkeit, die relative Abweichung der Zapfenerregungsverhältnisse direkt analog zur Berechnungsweise von Nascimento und Foster (1997) zu berechnen (vgl. Abschnitt 5.1.2). Hierbei werden zur Berechnung des Unterschieds zwischen zwei Farbflächen unter der Ausgangs- sowie der simulierten Zielbeleuchtung bei Verwendung der entsprechenden Simulationsbedingung die Abweichungen direkt über die verschiedenen aneinander angrenzenden Oberflächen ermittelt, anstelle zufällige Kombinationen zu verwenden.

Abbildung 5.11 zeigt den Vergleich zwischen den zwei Flächenzuordnungsmethoden und verdeutlicht, dass die Methode direkt angrenzender Flächen zu vergleichbaren Ergebnissen führt wie die in *Experiment VI* und *VIII* verwendete Seurat-Methode.

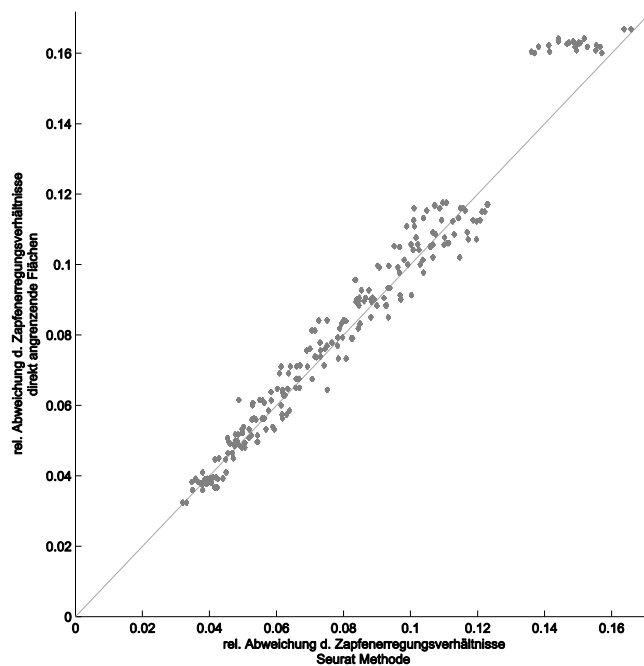


Abbildung 5.11: Vergleich der Berechnungsweisen durch die Seurat Methode und die ursprüngliche von Nascimento und Foster (1997) verwendete Methode angrenzender Flächen (feste Intervallbreite: 0.01)

Zur Untersuchung der *IV. Hypothese* wurde von den Versuchspersonen in jedem Durchgang der Beleuchtungswechsel gewählt, der mehr wie ein natürlicher aussieht. Dabei mussten sich die Versuchspersonen zwischen einem natürlich simulierten Beleuchtungswechsel und einem exakt normalisationskompatibel simulierten Beleuchtungswechsel entscheiden. Abbildung 5.12 zeigt die Präferenz für exakt normalisationskompatibel simulierte Beleuchtungswechsel in Abhängigkeit von der relativen Abweichung der Zapfenenerungsverhältnisse. Für alle erhobenen relativen Abweichungen der Zapfenenerungsverhältnisse zeigen sämtliche Versuchspersonen die Tendenz exakt normalisationskompatibel simulierte Beleuchtungswechsel zu bevorzugen. Diese Bevorzugung zeigt sich besonders ausgeprägt bei den Versuchspersonen 3 und 5, deren Präferenz zwischen 86% und 100% liegt. Bei den Versuchspersonen 1, 2, 4 und 6 liegt das Präferenzniveau deutlich niedriger und schwankt zwischen 50% und 77%, wobei nur Versuchsperson 1 die Schwelle von 75% tatsächlich an einer Stelle überschreitet. Über alle Versuchspersonen gemittelt ergibt sich somit eine Präferenz für exakt normalisationskompatibel simulierte Beleuchtungswechsel, die zwischen 0.72 und 0.78 liegt (vgl. Anhang C.8).

Die in Abbildung 5.12 mögliche Bildung zweier Versuchspersonengruppen ist auch bei der Betrachtung der direkten Abweichungen der simulierten Beleuchtungswechsel zu erkennen, wobei Abbildung 5.13 bei den letzten sechs gezeichneten Intervallen

ein stark variierendes Bild suggeriert. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass diese sechs Intervalle nur mit 2 bis 18 Urteilen pro Versuchsperson besetzt sind. Ebenso verhält es sich mit dem ersten besetzten Intervall, dessen Messpunkt auf sechs Urteilen pro Versuchsperson basiert.

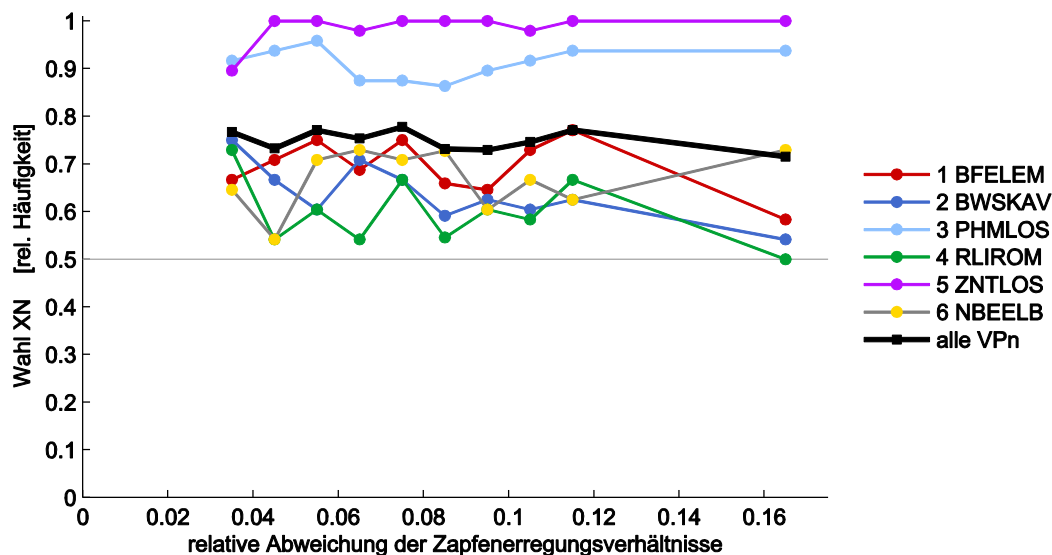


Abbildung 5.12: Ergebnisse *Experiment VIII*. Relative Häufigkeiten der Präferenz von exakt normalisationskompatibel korrigierten Beleuchtungswechseln vor natürlichen Beleuchtungswechseln in Abhängigkeit von der relativen Abweichung der Zapfenerregungsverhältnisse berechnet nach der Methode angrenzender Flächen (ΔCER , berechnet in Anlehnung an Nascimento und Foster (1997); feste Intervallbreite: 0.01).

Die zur Prüfung von *Hypothese V* verwendete Entscheidung zwischen einem exakt normalisationskompatibel und chromatisitäts-intensitäts korrigiert simulierten Beleuchtungswechsel und einem exakt normalisationskompatibel simulierten Beleuchtungswechsel zeigt Parallelen zu dem in Abbildung 5.10 dargestellten Ergebnis. Erneut zeigen die Versuchspersonen 3 und 5 eine sehr stark ausgeprägte Präferenz für exakt normalisationskompatibel simulierte Beleuchtungswechsel, während die Versuchspersonen 1, 2, 4 und 6 eine nur tendenzielle Präferenz für exakt normalisationskompatibel simulierte Beleuchtungswechsel zeigen (Abbildung 5.14). Bei der Interpretation von Abbildung 5.14 muss berücksichtigt werden, dass die Datenpunkte des 8. und 12. gezeichneten Intervalls auf weniger als 10 Urteilen pro Versuchsperson basieren und die des 10. und 11. Intervalls auf 10 bzw. 12 Urteilen basieren (vgl. Anhang C.8). Alle anderen gezeichneten Messpunkte eines Intervalls basieren auf mehr als 20 Urteilen.

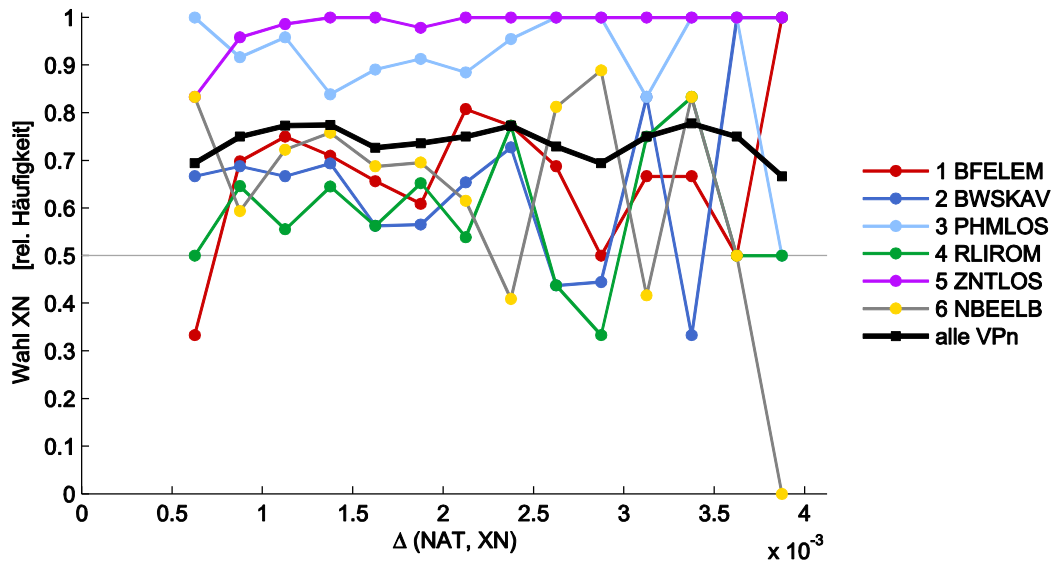


Abbildung 5.13: Ergebnisse *Experiment VIII*. Relative Häufigkeit der Bevorzugung von exakt normalisationskompatiblen Beleuchtungswechseln vor natürlichen Beleuchtungswechseln in Relation zum Grad der Abweichung $\Delta(NAT, XN)$ dieser Bedingungen. Feste Intervallbreite 0.00025.

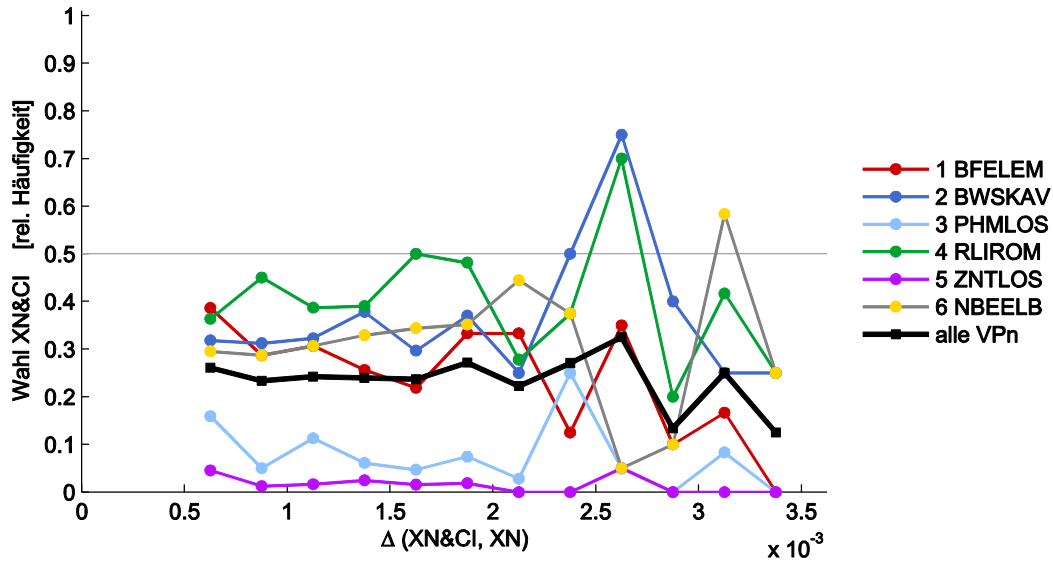


Abbildung 5.14: Ergebnisse *Experiment VIII*. Relative Häufigkeit der Bevorzugung von exakt normalisationskompatiblen und chromaticitäts-intensitäts korrigierten Beleuchtungswechseln vor exakt normalisationskompatiblen Beleuchtungswechseln, in Relation zum Grad der Abweichung $\Delta(XN\&CI, XN)$ dieser Bedingungen. Feste Intervallbreite 0.00025.

Auswertung der strukturierten Interviews. Ein vom Versuchsleiter geführtes strukturiertes Interview mit fünf zentralen Fragen zum Experiment bildete den letzten Schritt der Datenerhebung (Anhang C.9). Ziel des Interviews war es, Informationen zum Aufgabenverständnis und der Bearbeitungsweise der Teilnehmer zu gewinnen und sich ein Bild über die Vorstellungen der Teilnehmer von einem natürlichen Beleuchtungswechsel zu machen.

Die Versuchspersonen beschreiben natürliche Beleuchtungswechsel als homogene Veränderung, bei denen sich alle Oberflächen in gleicher Weise verändern (vgl. VP 1 - 5). Sie finden hierfür Umschreibungen wie „homogene Veränderung“ (VP 5), „einheitliche[r] Wechsel des Farbtons der gesamten Fläche“ (VP 3), dass „alle Farbfelder gleichzeitig heller oder dunkler werden“ (VP 2; in ähnlicher Weise auch VP 1) oder „Farbveränderungen nicht zu extrem sind“ (VP 4). Bemerkenswert hierbei ist, dass die Versuchspersonen 3 und 5 ein perfekt zu diesen Aussagen passendes Ergebnismuster zeigen (vgl. Abbildung 5.12).

Für keinen der Teilnehmer wirkten die Stimuli dreidimensional. Für die Bearbeitung der Aufgabe betrachteten alle Teilnehmer die gesamten Farbflächen, mit Ausnahme von Versuchsperson 4, die angab, sich vornehmlich auf die mittlere Oberfläche konzentriert zu haben.

5.4.2 Diskussion – Experiment VIII

Betrachtet man die über alle Versuchspersonen zusammengefassten Ergebnisse so zeigt sich eine Präferenz exakt normalisationskompatibel korrigierter Beleuchtungswechsel vor simuliert natürlichen Beleuchtungswechseln. Interessant hierbei ist, dass der Grad der Präferenz unabhängig von der Größe der relativen Abweichung der Zapfenerregungsverhältnisse zu sein scheint und nicht mit zunehmender Abweichung zuzunehmen scheint. Dies ist insofern nicht überraschend, als dass *Experiment VIII* nur die Präferenz von Beleuchtungswechseln bei größeren relativen Abweichungen der Zapfenerregungsverhältnisse untersucht. Beim Vergleich der Ergebnisse aus *Experiment VIII* mit dem äquivalenten Kurvenausschnitt in den Ergebnissen von Nascimento und Foster (1997) wird deutlich, dass auch in deren Ergebnisse mit zunehmender relativer Abweichung der Zapfenerregungsverhältnisse die Steigung der angefitzten Funktion abnimmt. Trifft man analog zu Nascimento und Foster (1997) auf Basis dieser kumulierten Daten eine Entscheidung über *Hypothese IV* so kommt man in der Tat zu dem Schluss, dass exakt normalisationskompatibel korrigierte Beleuchtungswechsel simuliert natürlichen Beleuchtungswechseln vorgezogen werden.

Betrachtet man jedoch die Präferenzurteile für jede Versuchsperson zeigt sich, dass sich die Versuchspersonen auf Grund ihres Antwortverhaltens in zwei Gruppen un-

terteilen lassen. Die erste Gruppe (VP 3, 5) zeichnet sich durch eine sehr starke Präferenz exakt normalisationskompatibel korrigierter Beleuchtungswechsel aus. Diese Präferenz ist beinahe perfekt. Die zweite Gruppe (VP 1, 2, 4, 6) zeigt eine tendenzielle Präferenz für exakt normalisationskompatibel korrigierte Beleuchtungswechsel. Jedoch ist die Stärke der Präferenz deutlich geringer ausgeprägt. Dies verdeutlicht, dass insgesamt eine ausgesprochen große Streuung zwischen den Versuchspersonen vorliegt. Diese Feststellung nährt die Vermutung, dass hier nicht nur allgemeinspsychologische Prozesse erfasst werden, sondern eventuell auch andere Prozesse miterfasst werden, die die Validität der Messung beeinträchtigen. Daher empfiehlt es sich die Aufgabenstellung und das experimentelle Paradigma genau zu analysieren. Da dies jedoch nicht nur *Experiment VIII* betrifft, sei an dieser Stelle auf die Allgemeine Diskussion zur dritten Forschungsfrage verwiesen (Abschnitt 6.4).

Abgesehen von den zwischen den Versuchspersonen stark variierenden Ergebnissen wird im Vergleich von *Experiment VIII* und *Experiment VII* deutlich, dass das Niveau der Präferenz von exakt normalisationskompatibel korrigierten Beleuchtungswechseln vor natürlich simulierten Beleuchtungswechseln in *Experiment VIII* angestiegen ist. Die zentrale Veränderung zwischen *Experiment VII* und *Experiment VIII* bestand in der Veränderung der Stimuli. *Experiment VII* arbeitete mit bildschirmfüllenden Seuratstimuli, die sich aus einer Vielzahl zufällig platzierter kleiner Ellipsen, gefüllt mit verschiedensten Oberflächenreflektanzen, zusammensetzten. In *Experiment VIII* wurde die Stimulusgröße sowie die Komplexität der Stimuli deutlich verringert. Der Stimulus in *Experiment VIII* bestand aus einem Quadrat von $6 \times 6^\circ$ Sehwinkel, das sich aus 49 quadratischen Feldern zusammensetzte, wobei jedem Feld eine andere Oberflächenreflektanz zugeordnet wurde. Durch die Reduktion auf 49 verschiedene Oberflächen, die geringere Stimulusgröße und die streng geometrische Anordnung der Oberflächen wurde das Vergleichen des Stimulus vor und nach dem Beleuchtungswechsel vereinfacht.

III

Diskussion

6. Zusammenfassende Diskussion

Im Zentrum dieser Arbeit steht die Untersuchung, welche Eigenschaften des chromatischen Inputs das Wahrnehmungssystem bei der temporalen Informationsanalyse und -integration nutzt, um die Konstruktion eines farbkonstanten Perzepts zu ermöglichen. Zwei Aspekte werden hierbei untersucht: Welche Eigenschaften des chromatischen Inputs das visuelle System bei der zeitlichen Analyse visueller Information nutzt steht im Fokus der ersten Forschungsfrage. Hierbei wurden chromatische Szenenstatistiken untersucht, die sich bereits bei der räumlichen Integration visueller Information als vielversprechende Hinweisreize etabliert haben (Abschnitt 2.3.2), die das Wahrnehmungssystem im Rahmen der Farbwahrnehmung nutzt. *Forschungsfrage II* rückt hingegen die Suche nach Auslösereizen für eine vom visuellen System durchgeführte aktive Anpassung der Informationsintegration an die neuen Beleuchtungsbedingungen in den Fokus. *Forschungsfrage III* untersucht die Rolle chromatischer Szenenstatistiken mit Hilfe direkter Urteile über Beleuchtungswechsel.

6.1 Forschungsfrage I - Die Rolle chromatischer Szenenstatistiken bei der temporalen Informationsintegration

Auf Basis der Erkenntnisse aus dem Kontext der räumlichen Integration visueller Information konzentriert sich *Forschungsfrage I* auf die Untersuchung zweier spezifischer chromatischer Szenenstatistiken bei der zeitlichen Integration visueller Information, den chromatischen Mittelwert und die Korrelation von Luminanz und Rötlichkeit. *Experiment I* zeigt, dass der chromatische Mittelwert eine chromatische Regularität beschreibt, welche vom visuellen System bei der temporalen Integration verwendet wird um zu einem farbkonstanten Perzept zu gelangen. Damit unterstützen die Ergebnisse die in *Hypothese I* formulierte Vorhersage, dass der chromatische Mittelwert ein geeigneter vom visuellen System genutzter Hinweisreiz ist. Einschränkung ist an dieser Stelle zu erwähnen, dass eine Beleuchtungsschätzung des visuellen Systems zwar ein naheliegender, aufgrund der spezifischen Konstruktionsbedingungen des Experiments jedoch kein zwingend zu Grunde liegender Ansatz ist. Die *Experimente II* und *III* untersuchten die Rolle der Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen nur partiell den erwarteten Effekt. So scheint eine sehr positive Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation zur Annahme einer rötlicheren Beleuchtung zu führen, im Vergleich zu einer Null-Korrelation oder einer negativen Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation. Eine negative *LRK* führt in der Tendenz jedoch zu neutralen Punkten mit gleicher oder höherer *I*-Chromatizität als eine Null-Korrelation und damit widersprechen die Ergebnisse der hier untersuchten Hy-

pothese klar. Prinzipiell lassen sich vier verschiedene Interpretationen dieses Ergebnismusters entwickeln.

1. Mangelnde Sensitivität des Meßinstruments. Bei der räumlichen Integration visueller Information zeigt sich bei einem Teil der Versuchspersonen ein geringerer Unterschied zwischen negativer Korrelationsbedingung und Null-Korrelations-Bedingung (vgl. Golz, 2005, Experiment 1). Dieser Effekt ist auch bei der zeitlichen Integration zu sehen. Nimmt man nun die Beobachtung hinzu, dass die Effekte auf die *I*-Chromatizität im temporalen Paradigma beim Vergleich der null-Korrelations-Bedingung mit der positiven Korrelations-Bedingung etwa halb so groß sind wie bei der räumlichen Integration (vgl. Kapitel 3.4.3), so liegt die Überlegung nahe, dass die Unterschiede zwischen Null-Korrelations-Bedingung und negativer-Korrelations-Bedingung zu gering sind um mit dem vorliegenden Messparadigma detektiert werden zu können. Betrachtet man jedoch die versuchspersonenspezifischen Mittelwerte dieser beiden Bedingungen, kann diese Überlegung verworfen werden. Zudem erklären diese Beobachtungen nicht das grundlegende Phänomen, dass die Unterschiede zwischen negativer Korrelations- Bedingung und Null-Korrelations-Bedingung geringer sind als die Unterschiede zwischen positiver Korrelations-Bedingung und Null-Korrelations-Bedingung.

2. Alternativer Hinweisreiz. Eine weitere Alternativerklärung, dass nicht die Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation sondern die Fläche mit der hellsten Luminanz als Anker für die geschätzte Beleuchtungschromatizität dient, kann aufgrund der Wahl des Stimulusfarbensets in Verbindung mit den Ergebnissen in *Experiment II* und *III* ausgeschlossen werden.

3. Verwerfen der LRK als ein vom visuellen System genutzter Hinweisreiz. Die Überlegung, die LRK als nützlichen Hinweisreiz bei der temporalen Integration visueller Information komplett zu verwerfen, wäre aufgrund des beobachteten partiellen Effektes beim Vergleich der positiven Korrelations-Bedingung mit dem Mittel aus negativer Korrelations-Bedingung und Null-Korrelations-Bedingung (2. Helmert Kontrast (vgl. Abschnitt 3.4.2)), unangebracht. Von der LRK als einer für das visuelle System vollumfänglich informativen chromatischen Regularität auszugehen, wäre ebenfalls eine Überinterpretation.

Weshalb sich kein Unterschied im Hinblick auf die *I*-Chromatizität der Farbkategoriengrenze zwischen negative-Korrelations-Bedingung und Null-Korrelations-Bedingung ergab, jedoch ein deutlicher Unterschied im Hinblick auf die *I*-Chromatizität der Farbkategoriengrenze in der positive-Korrelations-Bedingung im Vergleich zum Mittel aus negativer und Null-Korrelations-Bedingung gezeigt werden

konnte, kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht erklärt werden. Daher kann über mögliche Erklärungen nur spekuliert werden. Eine zentrale Schwierigkeit ist, dass sich die Wirkung der *LRK* in der Verschiebung des als neutral wahrgenommen Punktes zeigt. Das bedeutet, die Wirkung einer Korrelationsbedingung kann nur relativ zu anderen Korrelationsbedingungen und nicht in Relation zur Veränderung eines objektivierbaren Standards ermittelt werden. Daher ist es schwierig festzustellen, welche absoluten Wirkungen die einzelnen Bedingungen erzeugen und daraus mögliche Erklärungsansätze zu generieren. Eine mögliche Erklärung wäre die Beschränkung der *LRK* auf die Detektion rötlicher Beleuchtungen.

4. Beschränkung auf die Detektion rötlicher Beleuchtungen. Möglicherweise folgt der durch die temporale Integration auf die Beleuchtung attribuierte Teil der Rötlichkeit, der sich in der Verschiebung des als neutral wahrgenommenen Punktes zeigt, nicht einer linearen sondern einer komplexeren Funktion, beispielsweise einer sigmoiden Funktion. Damit wäre im temporalen Kontext die Aussagekraft der Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation auf stärker positive Korrelationen und damit auf die Detektion von Hinweisen auf eine rötliche Beleuchtung beschränkt.

Nutzung der Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation. Wenn bei einem gegebenen Mittelwert geringere bzw. negative Korrelationen auf einen größeren Anteil rötlicher Oberflächen hinweisen und daher gegen eine rötlichere Beleuchtung sprechen, muss die Beleuchtung andere Eigenschaften als eine hohe Rötlichkeit haben. Die eine Möglichkeit wäre, dass das visuelle System bei dieser groben Kategorisierung bleibt. Die andere Möglichkeit wäre, dass das visuelle System zur Beleuchtungsschätzung nicht nur den chromatischen Mittelwert und die Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation nutzt, sondern weitere Hinweisreize hinzuzieht, die in dem Bereich, in welchem die *LRK* nicht informativ ist, zusätzliche differenzierende Informationen einbringen. Eine solche Untersuchung anzustreben, wäre ein logischer nächster Schritt.

Hierfür wäre die Luminanz-Bläulichkeits-Korrelation ein möglicher cue, da sie einen Hinweis auf eine bläulichere werdende Beleuchtung kodieren kann. Gemeinsam mit der Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation, könnte sie diagnostischen Wert erlangen. Die Luminanz-Bläulichkeits-Korrelation wurde bereits von Golz (2005) intensiv untersucht. Bei der Simulation von Beleuchtungswechseln zeigte Golz, dass mit blauer werdender Beleuchtung, die Luminanz blauer Oberflächen selektiv stärker ansteigt im Vergleich zu grauen oder gelblichen Oberflächen. Betrachtet man die daraus ableitbare Szenenstatistik, zeigte sich jedoch, dass die Luminanz-Bläulichkeits-Korrelation einer Szene nahezu unabhängig von der Beleuchtung ist. Überzeugend hingegen ist der Befund, dass Graueinstellung von der im Umfeld um das Testfeld

vorherrschenden Luminanz-Bläulichkeits-Korrelation abhängen (Golz, 2005), das visuelle System also diesen cue nutzen kann. Das Hinzunehmen der Luminanz-Bläulichkeits-Korrelation als dritte Szenenstatistik könnte also gerade im Bereich geringer und negativer Luminanz-Rötlichkeits-Korrelationen gemeinsam mit der LRK zusätzlichen differenzierenden Wert ermöglichen. Dieser Überlegung liegt natürlich implizit die Annahme zu Grunde, dass das visuelle System verschiedene Hinweisreize integriert und hierbei eine ausprägungsabhängige Gewichtung vornimmt.

6.2 Forschungsfrage II - Dynamische Anpassungsprozesse bei der temporalen Informationsintegration

Forschungsfrage II stellt den Prozess der temporalen Informationsintegration in den Vordergrund und stellt die Frage, ob ein solcher zeitlicher Integrationsprozess flexibel auf Umweltveränderungen reagieren kann. Bevor man sich jedoch der Untersuchung dieser Fragestellung zuwenden kann, muss eine Auswahl möglicher Umweltveränderungen getroffen werden, die für einen solchen Auslösereiz verantwortlich sein können. Ein allgemeiner Literaturkorpus der sich mit dieser Frage beschäftigt, liegt abgesehen von einer Arbeit von Annan und Gilchrist (2004) nicht vor. Daher wurden zwei Kriterien erarbeitet, denen sich verschiedene mögliche Auslösereize zuordnen lassen: monitoring-unterbrechende Auslösereize, welche durch eine aktive Handlung des Beobachters die Beobachtung der Szene unterbrechen und monitoring-inhärente Auslösereize, welche außerhalb der Einflussbereichs des Beobachters stehen und Veränderungen der Umwelt anzeigen. *Experiment IV* untersuchte die Wirkung monitoring-unterbrechender Auslösereize am Beispiel einer Kopfbewegung verbunden mit dem Wechsel des Beobachtungsraums. Die Ergebnisse sprechen für die aktive Anpassung der Informationsintegration durch das visuelle System, wenn zuvor eine monitoring-unterbrechender Auslösereiz präsentiert wurde. Die Rolle monitoring-inhärenter Auslösereize bei der temporalen Integration visueller Information bleibt jedoch weiterhin eine offene Frage. Kurz andauernde, großflächige Luminanzveränderungen haben sich in *Experiment V* nicht bewährt.

6.3 Welches Bild der temporalen Informationsintegration ergibt sich nach der Untersuchung der Forschungsfragen I und II?

Die Ergebnisse zur Untersuchung der *Forschungsfrage I* weisen darauf hin, dass der chromatische Mittelwert und die Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation nicht nur bei der räumlichen Integration visueller Information sondern auch bei der temporalen Integration chromatische Regularitäten des visuellen Inputs darstellen, welche vom visuellen System genutzt werden. Betrachtet man den Integrationsprozess, so zeigt *Forschungsfrage II*, dass es dem Wahrnehmungssystem möglich ist, flexibel auf eine

Veränderung der Monitoringbedingungen, hier in Form einer Kopfbewegung, zu reagieren. Dieser Befund spricht sehr stark für ein komplexes aktiv mit der Umwelt interagierendes visuelles System. Die Fähigkeit, aktiv und dynamisch auf veränderte Beobachtungsbedingungen zu reagieren, ist eine Fähigkeit des visuellen Systems, die im Rahmen des Beleuchtungsschätzungsansatzes erklärt werden kann, jedoch nicht im Rahmen einfacher adaptiver Prozesse.

Über die Art und Weise, wie eine solche Anpassung im visuellen System implementiert sein könnte, kann nur spekuliert werden. Eine Möglichkeit wäre, dass es zu einer Verkleinerung des Zeitfensters, über das die visuelle Information integriert wird, kommt. Eine andere ähnliche Modellvorstellung wäre eine Verschiebung von Gewichtungsparametern für einzelne zu integrierende Informationen. Die dritte und einfachste Lösung wäre das komplette Verwerfen der momentanen Beleuchtungsschätzung und der damit verbundene Beginn einer komplett neuen Informationsintegration. Dass ein solcher radikaler Prozess stattfindet, ist auf Grund des eher mittleren Vorteils den die Präsentation eines monitoring-unterbrechenden Auslösereizes zur Folge hat, nicht kohärent mit den vorliegenden Daten.

Wenn das visuelle System eine Beleuchtungsschätzung vornimmt, um zu einem farbkonstanten Oberflächenperzept zu gelangen, wären der chromatische Mittelwert und die Lumianz-Rötlichkeits-Korrelation zwei differenzierende Hinweisreize, die das visuelle System bei der temporalen Informationsintegration verwenden könnte. Ebenso deutlich zeigen die Ergebnisse aus *Fragestellung I*, dass dies wahrscheinlich nicht die einzigen integrierten Informationen sind.

Die Dauer, in der ein solcher temporaler Integrationsprozess die eintreffenden Informationen aggregiert kann nicht exakt beschrieben werden. Die Arbeit von Lee, Dawson und Smithson (2012) weist darauf hin, dass ein solcher Integrationsprozess nach ca. 20s bei vielen Versuchspersonen einen festen Zustand erreicht, die Ergebnisse der Vorexperimente (Anhang B.1) zeigen ebenfalls, dass in den ersten 20s ein substantieller Unterschied des Adaptationszustandes erreicht wird.

Die Frage, ob die Variabilität der visuellen Information einen Einfluss auf die Beleuchtungsschätzung hat, kann an dieser Stelle nicht beantwortet werden, da in der Literatur die Variabilität mit der Präsentationsdauer konfundiert ist. Die Ergebnisse eines Vorexperiments (Anhang B.4) zeigen in der Tendenz an, dass die Zeitdauer deutlich wichtiger als die Anzahl der Stimuli ist. Eine abschließende Klärung dieser Frage steht jedoch noch aus.

Eine weitere Frage, welche sich zwingend stellt, ist die welche Rolle ein solch zeitlich lang andauernder Integrationsprozess spielen könnte, wenn eine schnelle, quasi unmittelbare räumliche Analyse zur Verfügung steht. Gesicherte Daten hierzu bestehen nicht, die theoretischen Überlegungen sind ebenso spekulativ. Eine Möglichkeit wäre, dass die so generierte Beleuchtungsschätzung, wenn sie mit der aktuellen räumlichen Beleuchtungsschätzung verbunden wird, eine stabilisierende Wirkung auf räumliche Schätzungen hat. In einer solchen Funktion wäre auch die aktive Anpassung der zeitlichen Beleuchtungsschätzung nach einem monitoring-unterbrechenden Auslösereiz eine nützliche Eigenschaft.

6.4 Forschungsfrage III - Direkte Urteile über Beleuchtungswechsel

Der zentrale Unterschied zwischen *Forschungsfrage III* und *Forschungsfrage I* liegt darin, dass zur Untersuchung der dritten Forschungsfrage die Versuchspersonen aufgefordert werden, direkt Aussagen über einen Beleuchtungswechsel zu treffen. Damit bietet dieses Untersuchungsparadigma (Nascimento & Foster, 1997) eine Möglichkeit die Rolle chromatischer Szenenstatistiken im Sinne des multi-trait-multi-method Gedankens in einer anderen Präsentationsweise und unter Zuhilfenahme anderer abhängiger Variablen zu untersuchen.

Die zentrale experimentelle Idee besteht im direkten Vergleich zweier Beleuchtungswechsel, welche dem visuellen System unterschiedliche Hinweisreize zum Erreichen eines farbkonstanten Perzepts zur Verfügung stellen. Nascimento und Foster (1997) definierten die exakte Normalisationskompatibilität als den zentralen Hinweisreiz zum Erreichen von Farbkonstanz. Sie zeigten in ihrer Arbeit, dass Versuchspersonen mit zunehmender Abweichung eines exakt normalisationskompatibel simulierten Beleuchtungswechsels von einem natürlich simulierten Beleuchtungswechsel, den exakt normalisationskompatibel simulierten Beleuchtungswechsel stärker bevorzugten. Im Rahmen der *Forschungsfrage II* bestand das Ziel darin, diesen Befund von Nascimento und Foster zu replizieren und dahingehend zu erweitern, die chromatische Regularität der Chromatizitäts-Intensitäts-Änderung als zusätzlichen Hinweisreiz für das visuelle System zu untersuchen.

Ingesamt wurden drei Experimente durchgeführt, wobei sich die *Experimente VI* und *VII* im Hinblick auf die verwendeten Sets aus natürlichen Oberflächenreflektanzspektren unterschieden. Eine Konsequenz dieser unterschiedlichen Sets aus Oberflächenreflektanzspektren liegt in der erreichten Abweichung zwischen einem exakt normalisationskompatibel simulierten Beleuchtungswechsel und einem Beleuchtungswechsel eines anderen Korrekturmodus (natürlich simulierte Beleuchtungswechsel oder

exakt normalisationskompatibel und chromatisitäts-intensitäts korrigierte Beleuchtungswechsel). *Experiment VII* und *VIII* unterschieden sich im Hinblick auf die Komplexität und Darstellungsgröße der Stimuli. Die Ergebnisse zeigen in Bezug auf *Hypothese IV* nur in *Experiment VIII* eine deutliche Bevorzugung exakt normalisationskompatibel korrigierter Beleuchtungswechsel vor natürlich simulierten Beleuchtungswechseln. In *Experiment VII* ist diese Bevorzugung tendenziell vorhanden, in *Experiment VI* nicht. Im Hinblick auf *Hypothese V* kann keine Bevorzugung exakt normalisationskompatibel und chromatisitäts-intensitäts korrigierter Beleuchtungswechsel vor ausschließlich exakt normalisationskompatibel korrigierten Beleuchtungswechseln festgestellt werden. Diese Ergebnisse aus den *Experimenten VI, VII, VIII* sprechen somit auf den ersten Blick gegen *Hypothese V* und *Experiment VIII* scheint jedoch für *Hypothese IV* zu sprechen.

Betrachtet man jedoch die Daten auf Versuchspersonenebene, zeigen sich sehr große Unterschiede zwischen den Versuchspersonen. So gibt es in den *Experimenten VII* und *VIII* Versuchspersonen mit einer beinahe perfekten Präferenz für normalisationskompatibel korrigierte Beleuchtungswechsel, andere zeigen eine deutlich schwächer ausgeprägte Präferenz. Eine mögliche Erklärung hierfür könnten durch die Aufgabe und das Paradigma verursachte Artefakte sein. Fragt man die Teilnehmer nach ihrem Verständnis von einem natürlichen Beleuchtungswechsel, so antworten viele, dass sie sich darunter einen Beleuchtungswechsel einer natürlichen Lichtquelle, der Sonne, vorstellen. Darüber hinaus beschreiben viele Versuchspersonen einen natürlichen Beleuchtungswechsel als einen homogenen Beleuchtungswechsel (*Experiment VIII*, VP 1 - 5), bei dem sich die Farben gleichmäßig und gleichstark verändern (*Experiment VII*, VP 7). Dies deutet darauf hin, dass in dem von Nascimento und Foster (1997) vorgeschlagenen und hier eingesetzten Paradigma nicht die Wahrnehmung eines Beleuchtungswechsels sondern ein durch kognitive Prozesse überlagertes Urteil erfasst wird, das die Vorstellung einer Person von einem natürlichen Beleuchtungswechsel widerspiegelt, nicht jedoch die Nutzung eines Hinweisreizes durch das Wahrnehmungssystem.

Um mit möglichst ökologisch validen Bedingungen zu arbeiten, wurden zur Untersuchung Spektren natürlicher Beleuchtungen und spektrophotometrische Messungen natürlicher Oberflächen eingesetzt. *Experiment VI* gewann dabei die Oberflächen aus Hyperspektralbildern natürlicher Szenen, was bedeutet, dass diese Oberflächenreflektanzspektren durchaus in dieser Kombination in der Natur auftreten können. Daher ist es beachtenswert, dass sich in *Experiment VI* keine eindeutige Bevorzugung eines Korrekturmodus zeigt. Zudem zeigt sich beim Vergleich dieser Ergebnisse mit den von Nascimento und Foster (1997) präsentierten Daten, dass die in *Experiment VI*

erzielten Abweichungen der natürlich simulierten Beleuchtungswechsel von den exakt normalisationskompatibel simulierten für die hier untersuchten natürlichen Oberflächensets sehr gering sind und solch geringe Abweichungen auch in der Arbeit von Nascimento und Foster keine eindeutigen Präferenzen für einen Korrekturmodus des Beleuchtungswechsels zeigen. Dies wirft einen ersten skeptischen Gedanken an die ökologische Validität auf, insbesondere wenn bedacht wird, dass hier exemplarisch sehr starke Beleuchtungsveränderungen als Beleuchtungswechsel dargestellt wurden. Jedoch könnte man argumentieren, dass die *Experiment VI* zu Grunde liegenden Szenen hauptsächlich Laubszenen zeigen und eine größere Vielfalt von Oberflächenreflektanzspektren durchaus auch in natürlichen Situationen auftreten können. Daher wurden für *Experiment VII* zufällige Kombinationen von Oberflächenreflektanzspektren von Blumen, Früchten oder Bäumen als Oberflächenreflektanzsets gewählt. Hierdurch werden deutlich größere Abweichungen zwischen den Korrekturmodi der Beleuchtungswechsel erreicht, jedoch zeigt auch *Experiment VII* keine eindeutige Bevorzugung eines Korrekturmodus. *Experiment VIII* hingegen zeigt eine Bevorzugung exakt normalisationskompatibel korrigierter Beleuchtungswechsel vor natürlich simulierten Beleuchtungswechseln und eine leichte Bevorzugung gegenüber exakt normalisationskompatibel und chromatisitäts-intensitäts korrigierten Beleuchtungswechseln. Die Beobachtung, dass die Reduktion der figuralen Komplexität deskriptiv ebenfalls Einfluss zu haben scheint, führt zu Fragen der ökologischen Validität bei der Untersuchung größerer Abweichungen. Aus methodischer Sicht kritisch zu diskutieren sind auch die versuchsplanerischen Schwierigkeiten des Paradigmas, wie die sequentielle Reizdarstellung oder die sehr allgemein formulierte Aufgabenstellung und die daraus folgenden Konsequenzen für die Reliabilität und Validität der Messung.

Aufgrund der nahe liegenden Alternativerklärung, dass hier ein von kognitiven Urteilsprozessen überformtes Urteil erfasst wurde, kann über die in den *Hypothesen IV* und *V* formulierten Vorhersagen keine seriöse Entscheidung getroffen werden. Obwohl die Arbeiten von Nascimento und Foster (1997) in der Literatur viel zitiert und deren Ergebnisse akzeptiert sind, sollte das von ihnen entwickelte Untersuchungsparadigma zumindest für die hier formulierten Fragestellungen als ungeeignet angesehen werden.

7. Literaturverzeichnis

- Annan, V., & Gilchrist, A. (2004). Lightness depends on immediately prior experience. *Perception & Psychophysics*, 66, 943–52.
- Arend, L. E. (1993). How much does illuminant color affect unattributed colors? *Journal of the Optical Society of America A - Optics Image Science and Vision*, 10(10), 2134. <http://doi.org/10.1364/JOSAA.10.002134>
- Arend, L. E., & Reeves, A. (1986). Simultaneous color constancy. *Journal of the Optical Society of America A - Optics Image Science and Vision*, 3, 1743–1751. <http://doi.org/10.1364/josaa.3.001743>
- Arend, L. E., Reeves, A., Schirillo, J., & Goldstein, R. (1991). Simultaneous color constancy: paper with diverse Munsell values. *Journal of the Optical Society of America A - Optics Image Science and Vision*, 8(4), 661–672.
- Bloj, M. G., Kersten, D., & Hurlbert, A. C. (1999). Perception of three-dimensional shape influences colour perception through mutual illumination. *Nature*, 402, 877–879. <http://doi.org/10.1038/47245>
- Brainard, D. H. (1989). Calibration of a computer controlled color monitor. *Color Research & Application*, 14(1), 23–34. <http://doi.org/10.1002/col.5080140107>
- Brainard, D. H. (1995). Colorimetry. In M. Bass (Ed.), *OSA Handbook of Optics* (2nd ed., Vol. 1, pp. 26.1–26.54). New York (NY): McGraw-Hill.
- Brainard, D. H. (2004). Color constancy. In J. S. Werner & L. M. Chalupa (Eds.), *The visual neurosciences* (pp. 948–961). Cambridge, Mass: MIT Press.
- Brainard, D. H., Brunt, W. A., & Speigle, J. M. (1997). Color constancy in the nearly natural image. I. Asymmetric matches. *Journal of the Optical Society of America A - Optics Image Science and Vision*, 14, 2091–110.
- Brainard, D. H., & Maloney, L. T. (2011). Surface color perception and equivalent illumination models. *Journal of Vision*, 11, 1 – 18. <http://doi.org/10.1167/11.5.1>
- Brainard, D. H., & Stockman, A. (2010). Colorimetry. In M. Bass & Optical Society of America (Eds.), *Vision and vision optics* (3. Ed., pp. 10.1–10.56). New York: McGraw-Hill.

- Brainard, D. H., & Wandell, B. A. (1992). Asymmetric color matching: how color appearance depends on the illuminant. *Journal of the Optical Society of America A - Optics Image Science and Vision*, 9, 1433–1448.
- Brown, P. K., & Wald, G. (1963). Visual pigments in human and monkey retinas. *Nature*, 200(4901), 37–43. <http://doi.org/10.1038/200037a0>
- Brown, P. K., & Wald, G. (1964). Visual pigments in single rods and cones of the human retina. Direct measurements reveal mechanisms of human night and color vision. *Science*, 144(3614), 45–52.
- Brown, R. O. (2003). Background and illuminants: The yin and yang of colour constancy. In R. Mausfeld & D. Heyer (Eds.), *Colour Perception: Mind and the Physical World* (pp. 247–272). New York (NY): Oxford University Press.
- Buchsbaum, G. (1980). A spatial processor model for object colour perception. *Journal of the Franklin Institute*, 310(1), 1–26. [http://doi.org/10.1016/0016-0032\(80\)90058-7](http://doi.org/10.1016/0016-0032(80)90058-7)
- Burr, D. (2005). Vision: In the Blink of an Eye. *Current Biology*, 15(14), R554–R556. <http://doi.org/10.1016/j.cub.2005.07.007>
- Cao, D., Pokorný, J., & Smith, V. C. (2005). Associating color appearance with the cone chromaticity space. *Vision Research*, 45(15), 1929–1934. <http://doi.org/10.1016/j.visres.2005.01.033>
- Delahunt, P. B., & Brainard, D. H. (2004). Does human color constancy incorporate statistical regularity of natural daylight? *Journal of Vision*, 4, 57–81. <http://doi.org/10.1167/4.2.1>
- D’Zmura, M., & Lennie, P. (1986). Mechanisms of color constancy. *Journal of the Optical Society of America A - Optics Image Science and Vision*, 3, 1662–1672.
- Ekroll, V., & Faul, F. (2009). A simple model describes large individual differences in simultaneous colour contrast. *Vision Research*, 49, 2261–2272. <http://doi.org/10.1016/j.visres.2009.06.015>
- Ekroll, V., & Faul, F. (2012). New Laws of Simultaneous Contrast? *Seeing and Perceiving*, 25(2), 107–141. <http://doi.org/10.1163/187847612X626363>
- Fairchild, M. D., & Lennie, P. (1992). Chromatic adaptation to natural and incandescent illuminants. *Vision Research*, 32, 2077–2085.
- Fairchild, M. D., & Reniff, L. (1995). Time course of chromatic adaptation for color-appearance judgements. *Journal of the Optical Society of America A - Optics Image Science and Vision*, 12, 824–833.

- Foster, D. H. (2003). Does colour constancy exist? *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 439–443. <http://doi.org/10.1016/j.tics.2003.08.002>
- Foster, D. H. (2011). Color constancy. *Vision Research*, 51, 674–700. <http://doi.org/10.1016/j.visres.2010.09.006>
- Foster, D. H., & Nascimento, S. M. (1994). Relational colour constancy from invariant cone-excitation ratios. *Proceedings of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences*, 257, 115–121. <http://doi.org/10.1098/rspb.1994.0103>
- Foster, D. H., Nascimento, S. M. C., Craven, B. J., Linnell, K. J., Cornelissen, F. W., & Brenner, E. (1997). Four issues concerning colour constancy and relational colour constancy. *Vision Research*, 37(10), 1341–1345. [http://doi.org/10.1016/S0042-6989\(96\)00285-4](http://doi.org/10.1016/S0042-6989(96)00285-4)
- Gelb, A. (1929). Die “Farbenkonstanz” der Sehdinge. In A. Bethe, G. Bergmann von, G. Emden, & A. Ellinger (Eds.), *Receptionsorgane II* (Vol. 12/1). Berlin: Springer.
- Gilchrist, A. L. (2006). *Seeing black and white*. Oxford: Oxford University Press.
- Golz, J. (2005). *Chromatic scene statistics as cues for the perception of surface and illumination colour*. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel, Germany.
- Golz, J. (2008). The role of chromatic scene statistics in color constancy: spatial integration. *Journal of Vision*, 8(13), 1–16. <http://doi.org/10.1167/8.13.6>
- Golz, J. (2010). Colour constancy: Influence of viewing behaviour on grey settings. *Perception*, 39, 606–619.
- Golz, J., & MacLeod, D. I. (2003). Colorimetry for CRT displays. *Journal of the Optical Society of America A - Optics Image Science and Vision*, 20, 769–781.
- Golz, J., & MacLeod, D. I. A. (2002). Influence of scene statistics on colour constancy. *Nature*, 415, 637–40. <http://doi.org/10.1038/415637a>
- Granzier, J. J. M., Brenner, E., Cornelissen, F. W., & Smeets, J. B. J. (2005). Luminance-color correlation is not used to estimate the color of the illumination. *Journal of Vision*, 5, 20–27. <http://doi.org/10.1167/5.1.2>
- Granzier, J. J. M., Brenner, E., & Smeets, J. B. J. (2009). Can illumination estimates provide the basis for color constancy? *Journal of Vision*, 9(3), 1–11. <http://doi.org/10.1167/9.3.18>
- Granzier, J. J. M., Toscani, M., & Gegenfurtner, K. R. (2012). Role of eye movements in chromatic induction. *Journal of the Optical Society of America A - Optics Image Science and Vision*, 29, A353–A365.

- Grassmann, H. (1902). Zur Theorie der Farbenmischung. In J. Lüroth & F. Engel (Eds.), *Die Abhandlungen zur Mechanik und zur mathematischen Physik* (Vol. 2.2, pp. 161–173). Leipzig: B. G. Teubner.
- Hansen, T., Olkkonen, M., Walter, S., & Gegenfurtner, K. R. (2006). Memory modulates color appearance. *Nature Neuroscience*, 9(11), 1367–1368.
<http://doi.org/10.1038/nn1794>
- Hansen, T., Walter, S., & Gegenfurtner, K. R. (2007). Effects of spatial and temporal context on color categories and color constancy. *Journal of Vision*, 7(4), 1–15.
<http://doi.org/10.1167/7.4.2>
- Helmholtz, H. v. (1867). *Handbuch der physiologischen Optik*. Leipzig: L. Voss.
- Helson, H. (1943). Some factors and implications of color constancy. *Journal of the Optical Society of America*, 33(10), 555–567.
<http://doi.org/10.1364/JOSA.33.000555>
- Helson, H. (1947). Adaptation-level as frame of reference for prediction of psychophysical data. *American Journal of Psychology*, 60, 1–29.
- Hering, E. (1920). *Grundzüge der Lehre vom Lichtsinn*. Berlin: J. Springer.
- Hiltunen, J. (n.d.). *Munsell colors matt (spectrofotometer measured)*. Retrieved from http://cs.joensuu.fi/~spectral/databases/download/munsell_spec_matt.htm
- Hirschmueller, A. K., & Golz, J. (2011). The role of chromatic scene statistics in colour constancy: Temporal integration. *Perception*, 40, 198–198.
- Irtel, H. (1991). *Psychophysische Invarianzen in der Farb- und Helligkeitswahrnehmung*. Berlin: Springer-Verlag.
- Ishihara, S. (1967). *Tests for colour-blindness*. Tokyo: Kanehara Shuppan Co., LTD.
- Jameson, D., & Hurvich, L. M. (1989). Essay concerning color constancy. *Annual Review of Psychology*, 40, 1–22.
- Kingdom, F. A. A., & Prins, N. (2010). *Psychophysics: a practical introduction*. Amsterdam: Academic Press.
- König, A., & Dieterici, C. (1892). *Die Grundempfindungen in normalen und anomalen Farbensystemen und ihre Intensitätsverteilung im Spektrum*. Hamburg: Leopold Voss.
- Kraft, J. M., & Brainard, D. H. (1999). Mechanisms of color constancy under nearly natural viewing. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 96, 307–312.

- Krantz, D. H. (1975). Color measurement and color theory: I. Representation theorem for Grassmann structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 12(3), 283–303. [http://doi.org/10.1016/0022-2496\(75\)90026-7](http://doi.org/10.1016/0022-2496(75)90026-7)
- Land, E. H. (1983). Recent advances in retinex theory and some implications for cortical computations: color vision and the natural image. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 80(16), 5163–5169.
- Land, E. H. (1986). Recent advances in Retinex theory. *Vision Research*, 26(1), 7–21.
- Lee, R. J., Dawson, K. A., & Smithson, H. E. (2012). Slow updating of the achromatic point after a change in illumination. *Journal of Vision*, 12(1), 1–22. <http://doi.org/10.1167/12.1.19>
- Lee, R. J., & Smithson, H. E. (2012). Context-dependent judgments of color that might allow color constancy in scenes with multiple regions of illumination. *Journal of the Optical Society of America A - Optics Image Science and Vision*, 29, A247–A257.
- Lennie, P. (1999). Color coding in the cortex. In K. R. Gegenfurtner & L. T. Sharpe (Eds.), *Color vision: from genes to perception* (pp. 235–248). Cambridge: Cambridge University Press.
- Lennie, P., Pokorný, J., & Smith, V. C. (1993). Luminance. *Journal of the Optical Society of America A - Optics Image Science and Vision*, 10(6), 1283–1293.
- Linnell, K. J., & Foster, D. H. (2002). Scene articulation: dependence of illuminant estimates on number of surfaces. *Perception*, 31(2), 151–159. <http://doi.org/10.1068/p03sp>
- MacLeod, D. I. A. (2003). New dimensions in color perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 97–99.
- MacLeod, D. I. A., & Boynton, R. M. (1979). Chromaticity diagram showing cone excitation by stimuli of equal luminance. *Journal of the Optical Society of America A - Optics Image Science and Vision*, 69, 1183–6.
- MacLeod, D. I. A., & Golz, J. (2003). A computational analysis of colour constancy. In R. Mausfeld & D. Heyer (Eds.), *Colour perception: mind and the physical world* (pp. 205–242). Oxford: Oxford University Press.
- Maloney, L. T., & Yang, J. N. (2003). The illuminant estimation hypothesis and surface colour perception. In R. Mausfeld & D. Heyer (Eds.), *Colour perception: mind and the physical world* (pp. 381–436). Oxford: Oxford University Press.

- Mausfeld, R. (1998). Color Perception: From Grassmann codes to a dual code for object and illumination colors. In W. Backhaus, R. Kliegl, & J. S. Werner (Eds.), *Color Vision. Perspectives from different disciplines* (pp. 219–250). Berlin: De Gruyter.
- Mausfeld, R. (2003). 'Colour' as part of the format of two different perceptual primitives: The dual coding of colour. In R. Mausfeld & D. Heyer (Eds.), *Colour perception: mind and the physical world* (pp. 381–436). Oxford: Oxford University Press.
- Mausfeld, R. (2005). Wahrnehmungspsychologie: Geschichte und Ansätze. In J. Funke & P. French (Eds.), *Handwörterbuch Allgemeine Psychologie: Kognition*. Göttingen: Hogrefe.
- Mausfeld, R. (2011a). Intrinsic Multiperspectivity: Conceptual forms and the functional architecture of the perceptual system. In W. Welsch, W. J. Singer, & A. Wunder (Eds.), *Interdisciplinary Anthropology* (pp. 19–54). Berlin: Springer. Retrieved from http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-3-642-11668-1_2
- Mausfeld, R. (2011b). Wahrnehmungspsychologie. In A. Schütz, H. Selg, M. Brand, & S. Lautenbacher (Eds.), *Psychologie: eine Einführung in ihre Grundlagen und Anwendungsfelder*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Mausfeld, R., & Andres, J. (2002). Second-order statistics of colour codes modulate transformations that effectuate varying degrees of scene invariance and illumination invariance. *Perception*, 31, 209–224. <http://doi.org/10.1068/p07sp>
- Mausfeld, R., & Heyer, D. (2003). *Colour perception: mind and the physical world*. Oxford: Oxford University Press.
- McCann, J. J., McKee, S. P., & Taylor, T. H. (1976). Quantitative studies in retinex theory. A comparison between theoretical predictions and observer responses to the "color mondrian" experiments. *Vision Research*, 16(5), 445–IN3. [http://doi.org/10.1016/0042-6989\(76\)90020-1](http://doi.org/10.1016/0042-6989(76)90020-1)
- Mollon, J. D. (2003). The origins of modern color science. In S. K. Shevell, *The science of color* (2nd ed., pp. 1–38). Oxford, United Kingdom: Elsevier.
- Nascimento, S. M., & Foster, D. H. (1997). Detecting natural changes of cone-excitation ratios in simple and complex coloured images. *Proceedings of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences*, 264, 1395–1402. <http://doi.org/10.1098/rspb.1997.0194>

- Niederée, R. (1998). *Die Erscheinungsweisen der Farben und ihre stetigen Übergangsformen: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur relationalen Farbcodierung und zur Dimensionalität vollständiger perzeptueller Farbcodes* (Habilitation). Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel.
- Pinheiro, J. C., & Bates, D. M. (2000). *Mixed-effects models in S and S-PLUS*. New York: Springer.
- Prins, N., & Kingdom, F. A. A. (2012). Palamedes: Matlab routines for analyzing psychophysical data (Version 1.5.0). Retrieved from <http://www.palamedestoolbox.org>
- Richter, M. (1981). *Einführung in die Farbmatrik*. Berlin: De Gruyter.
- Rinner, O., & Gegenfurtner, K. R. (2000). Time course of chromatic adaptation for color appearance and discrimination. *Vision Research*, 40, 1813–26.
- Ruderman, D. L., Cronin, T. W., & Chiao, C. C. (1998). Statistics of cone responses to natural images: implications for visual coding. *Journal of the Optical Society of America A - Optics Image Science and Vision*, 15, 2036–2045.
- Rutherford, M. D., & Brainard, D. H. (2002). Lightness constancy: A direct test of the illumination-estimation hypothesis. *Psychological Science*, 13(2), 142–149. <http://doi.org/10.1111/1467-9280.00426>
- Schultz, S., Doerschner, K., & Maloney, L. T. (2006). Color constancy and hue scaling. *Journal of Vision*, 6, 1102–1116. <http://doi.org/10.1167/6.10.10>
- Shevell, S. K. (2003). Color appearance. In S. K. Shevell, *The science of color* (2nd ed., pp. 149–189). Oxford, United Kingdom: Elsevier.
- Smithson, H. E. (2005). Sensory, computational and cognitive components of human colour constancy. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 360, 1329–1346. <http://doi.org/10.1098/rstb.2005.1633>
- Smithson, H. E., & Zaidi, Q. (2004). Colour constancy in context: roles for local adaptation and levels of reference. *Journal of Vision*, 4, 693–710.
- Smith, V. C., & Pokorny, J. (1975). Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm. *Vision Research*, 15(2), 161–171. [http://doi.org/10.1016/0042-6989\(75\)90203-5](http://doi.org/10.1016/0042-6989(75)90203-5)
- Smith, V. C., & Pokorny, J. (1996). The design and use of a cone chromaticity space: a tutorial. *Color Research and Application*, 21, 375–383.

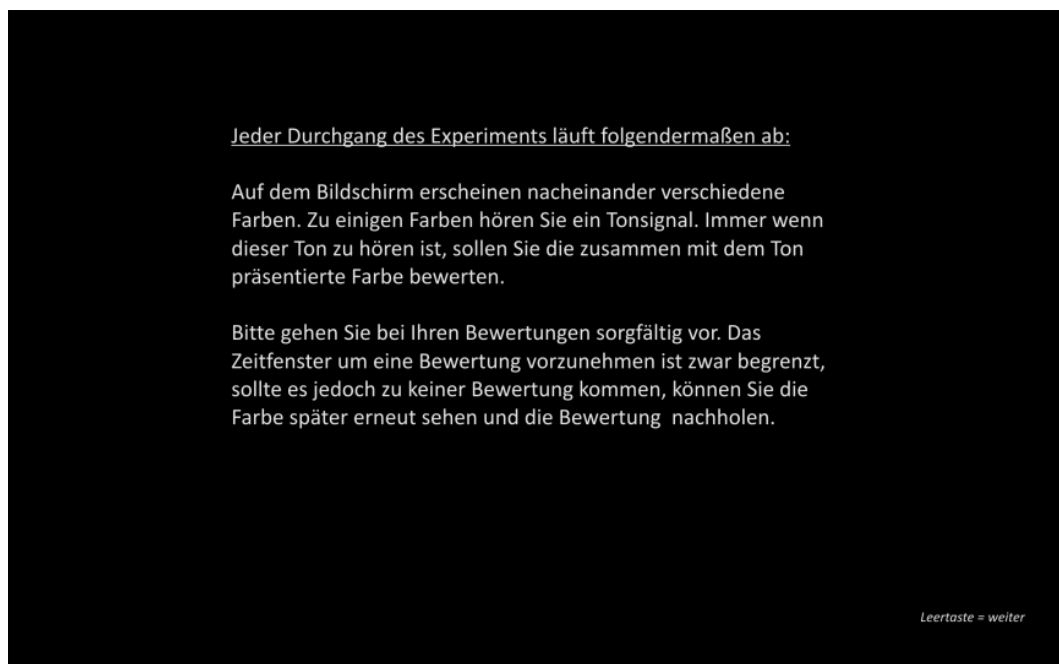
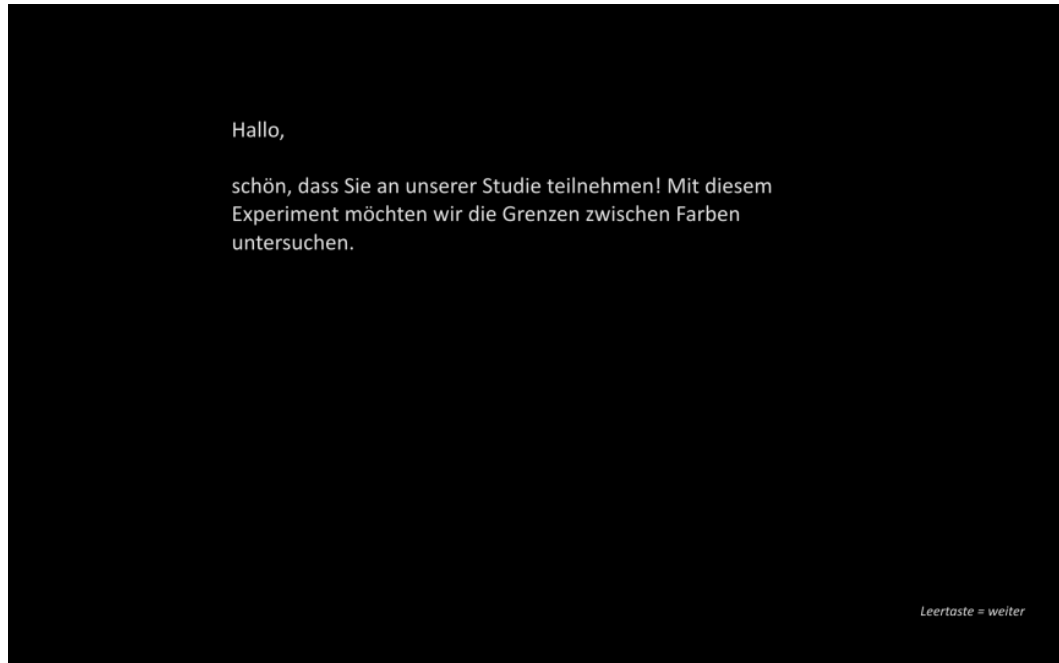
- Stockman, A., MacLeod, D. I. A., & Johnson, N. E. (1993). Spectral sensitivities of the human cones. *Journal of the Optical Society of America A - Optics Image Science and Vision*, *10*(12), 2491–2521. <http://doi.org/10.1364/JOSAA.10.002491>
- Stockman, A., MacLeod, D. I. A., & Johnson, N. E. (1993). Spectral sensitivities of the human cones. *Journal of the Optical Society of America A*, *10*(12), 2491. <http://doi.org/10.1364/JOSAA.10.002491>
- The MathWorks Inc. (2009). MATLAB R2009a (Version 7.8.0.347 (R2009a)) [Win32].
- Uchikawa, K., Uchikawa, H., & Boynton, R. M. (1989). Partial color constancy of isolated surface colors examined by a color-naming method. *Perception*, *18*(1), 83–91.
- Van Trigt, C. (2010). von Kries versus color constancy. *Color Research and Application*, *35*, 164–183. <http://doi.org/10.1002/col.20526>
- Von Kries, J. (1905). Die Gesichtsempfindungen. In W. Nagel (Ed.), *Physiologie der Sinne* (Vol. 3, pp. 109–282). Braunschweig: Vieweg und Sohn.
- Webster, M. A., & Mollon, J. D. (1997). Adaptation and the color statistics of natural images. *Vision Research*, *37*, 3283–3298.
- Werner, A. (2014). Spatial and temporal aspects of chromatic adaptation and their functional significance for colour constancy. *Vision Research*, *104*, 80–89. <http://doi.org/10.1016/j.visres.2014.10.005>
- Werner, A., Sharpe, L. T., & Zrenner, E. (2000). Asymmetries in the time-course of chromatic adaptation and the significance of contrast. *Vision Research*, *40*, 1101–1113.
- Wichmann, F. A., & Hill, N. J. (2001). The psychometric function: I. Fitting, sampling, and goodness of fit. *Perception & Psychophysics*, *63*, 1293–1313.
- Wyszecki, G. (1960). *Farbsysteme*. Göttingen: Musterschmidt-Verlag.
- Wyszecki, G., & Stiles, W. S. (2000a). *Color science: concepts and methods, quantitative data, and formulae* (2nd ed.). New York (NY): John Wiley & Sons.
- Wyszecki, G., & Stiles, W. S. (2000b). Physical data. In *Color science: concepts and methods, quantitative data, and formulae* (2nd ed., pp. 1–82). New York: John Wiley & Sons.
- Wyszecki, G., & Stiles, W. S. (2000c). Theories and models of color vision. In *Color science: concepts and methods, quantitative data, and formulae* (2nd ed., pp. 582–689). New York: John Wiley & Sons.

- Young, T. (1802). The Bakerian Lecture: On the theory of light and colours. *Philosophical Transactions of the Royal Society London*, 92, 14–48.
- Zaidi, Q. (1998). Identification of illuminant and object colors: heuristic-based algorithms. *Journal of the Optical Society of America A - Optics Image Science and Vision*, 15, 1767–1776.

Anhang

Anhang A

A.1 Instruktion Experiment I



Aufgabe:

Ihre Aufgabe ist nun zu entscheiden, ob die gemeinsam mit dem Ton präsentierte Farbe **rot** oder **grün** ist.

Dazu benutzen Sie die Pfeiltasten:

Pfeiltaste links



Pfeiltaste rechts

rot

grün

Leertaste = Start

Aufgabe:

Ihre Aufgabe ist nun zu entscheiden, ob die gemeinsam mit dem Ton präsentierte Farbe **blau** oder **gelb** ist.

Dazu benutzen Sie die Pfeiltasten:

Pfeiltaste links



Pfeiltaste rechts

blau

gelb

Leertaste = Start

A.2 Experiment I - Teststrecken der Staircases

Staircase	Unterer Endpunkt			Oberer Endpunkt		
	l	s	Lum^*	l	s	Lum^*
Untersuchungsbedingung mittlere l-Chromatizität						
+2 sd	0.66	1.4538	85	0.722	1.4538	85
+1 sd	0.66	1.3002	85	0.722	1.3002	85
0 sd	0.66	1.1466	85	0.722	1.1466	85
-1 sd	0.66	0.993	85	0.722	0.993	85
-2 sd	0.66	0.8394	85	0.722	0.8394	85
Untersuchungsbedingung mittlere s-Chromatizität						
+2 sd	0.6977	0.2798	85	0.6977	2.1682	85
+1 sd	0.6927	0.2798	85	0.6927	2.1682	85
0 sd	0.6877	0.2798	85	0.6877	2.1682	85
-1 sd	0.6827	0.2798	85	0.6827	2.1682	85
-2 sd	0.6777	0.2798	85	0.6777	2.1682	85

* Luminanz

A.3. Experiment 1 - Farbkonstanzindizes für alle Teilnehmer, Bedingungen und Messebenen.

Bedingung	VPn	-2 SD	-1 SD	zentral	+1 SD	+2 SD
Rot	1	0.71	0.70	0.78	0.64	0.74
	2	0.87	0.88	0.85	0.77	1.12
	3	0.87	0.83	0.89	0.79	0.79
	4	0.64	0.76	0.74	0.73	0.70
	alle	0.77	0.79	0.81	0.73	0.84
Grün	1	0.92	0.87	0.75	0.82	0.99
	2	0.97	0.89	0.81	0.80	0.63
	3	0.69	0.65	0.90	0.61	0.78
	4	0.78	0.91	0.81	0.75	0.81
	alle	0.84	0.83	0.82	0.75	0.80
Blau	1	0.79	0.62	0.90	0.80	1.05
	2	0.79	0.84	0.95	0.81	0.67
	3	0.39	0.78	0.81	0.87	0.88
	4	0.42	0.65	0.74	0.68	0.58
	alle	0.60	0.72	0.85	0.79	0.79
Gelb	1	0.71	0.88	0.69	0.64	0.51
	2	0.75	0.74	-0.02	0.18	0.53
	3	0.80	0.75	0.87	0.85	0.82
	4	0.70	0.85	0.45	0.73	0.76
	alle	0.74	0.80	0.50	0.60	0.66

A.4 Instruktion *Experiment II*

Mündliche Instruktion, hier die Formulierungsvorgaben für den Versuchsleiter.

Erklärung des Experiments

- Grenzen zwischen Farben (werden untersucht)
- Dazu gibt es 1 Übungsdurchgang und 9 weitere Durchgänge
- Bei den 9 Durchgängen folgt nach jedem 3. Durchgang eine Pause von 2 min.
- Danach geht es ohne Vorwarnung weiter. Entspannen Sie einen Augenblick und halten Sie sich dann bereit, damit Sie den Beginn nicht verpassen.
- Jeder Durchgang läuft folgendermaßen ab:
 - Bildschirm erscheinen nacheinander verschiedene Farben.
 - Zu einigen Farben hören Sie ein Tonsignal (knacken).
Immer wenn Ton → (gleichzeitig) dargestellte Farbe bewerten
 - SORGFÄLTIG vorgehen
→ das Zeitfenster ist begrenzt, Urteil kann aber nachgeholt werden.
 - Aufgabe: zu entscheiden, ob die präsentierte Farbe rot oder grün ist.

Rot links ← → grün rechts

A.5. *Experiment II* - Strukturiertes Interview

Fragen und Antworten des abschließenden strukturierten Interviews in *Experiment II*. Die Antworten wurden vom Versuchsleiter notiert.

VPn	Antwort
<i>Ist etwas aufgefallen? Gab es Probleme?</i>	
1 BKELLB	nein
2 MBDLOI	Die zweite Session erschien mir schwieriger.
3 RHMLRS	Ich habe relativ oft grau gesehen gegen Ende der Durchgänge. Außerdem sah ich einen roten Rand um das Kästchen. 1-2 Mal verdrückt, teilw. wirkt die Mitte grau/bzw. dunkler als der Rand.
4 PHMLOS	Quadrat wirkte nicht gleichmäßig beleuchtet. Es schien als wäre ein Kreis drin, der sich bewegt. Manchmal auch in den Pausen, kam eine andere Form heraus.
5 NKELHR	Die Reize waren manchmal ambigue
6 NFELEG	nein
<i>Hat das Treffen der Starts nach der Pause geklappt?</i>	
1 BKELLB	Ja, kein Problem
2 MBDLOI	Ja
3 RHMLRS	Ja! Kästchen sind relativ hell, daher leicht zu bemerken.
4 PHMLOS	Anfang nach Pause erwischt.
5 NKELHR	Anfänge zu treffen war ok
6 NFELEG	1 Mal verpasst
<i>War die Dauer des Experiments in Ordnung?</i>	
1 BKELLB	Ja, länger wäre unangenehm geworden
2 MBDLOI	Ja, hätte aber auch nicht länger sein dürfen
3 RHMLRS	Ich habe Durchgänge gezählt, um abzuschätzen wie lang es noch dauert. War insgesamt in Ordnung.
4 PHMLOS	Beim 1. Termin gegen Ende anstrengend. Beim 2. Termin war es aber ok
5 NKELHR	Länge war ok
6 NFELEG	War okay

VPn	Antwort
<i>Ist irgendetwas systematisches aufgefallen?</i>	
1 BKELLB	Die Durchgänge waren am Anfang ähnlich und wurden zum Ende der einzelnen Durchgänge schwieriger.
2 MBDLOI	Nein
3 RHMLRS	Die ersten fünf waren „knall rot“ oder „knall grün“, nachdem ich mich verdrückt habe, kam öfter die andere Farbe, anfangs waren die Felder bunt, dann irgendwann grau.
4 PHMLOS	Nach den Pausen waren die ersten Bilder besser zu erkennen.
5 NKELHR	Kein System in den Reizen bemerkt.
6 NFELEG	Nein, obwohl ich die Null-Hypothese kennen müsste, habe ich nichts entsprechendes erkennen, wiedererkennen können. Keine Systematik erkennbar, für mich waren alle Durchgänge gleich.
<i>Wie sind sie während des Experiments vorgegangen?</i>	
1 BKELLB	Ich habe eher die Mitte fixiert...
2 MBDLOI	Ich habe gezählt, wie oft ich „klicken“ musste. Ich habe die Mitte fixiert, gelegentlich mit den Augen hin und her geschaut. Gelegentlich habe ich die Rot-/Grün-Taste verwechselt.
3 RHMLRS	Anfangs habe ich eher die Mitte fixiert, sobald es undeutlicher wurde, habe ich variiert.
4 PHMLOS	Die ganze Zeit die Farben betrachtet.
5 NKELHR	-
6 NFELEG	Habe mir jeden einzelnen Reiz angeschaut und versucht zu erkennen, ob er rötlich oder grünlich ist, nur wenn gar nichts zu erkennen war, habe ich zufällig gedrückt. Habe aber versucht kleinste Nuancen zu erkennen. Habe mich auf das Testfeld konzentriert. Habe dort auf die Mitte gesehen.

A.6 Experiment II - Deskriptive Ergebnisse

Deskriptive Ergebnisse aus *Experiment II*.

<i>VPnr^a</i>	<i>M(I)</i>	<i>SD(I)</i>	<i>SEM(I)</i>	<i>s-Achse</i>
negative-LRK-Bedingung				
1	0.688273	0.000741	0.000303	1.1466
2	0.686849	0.000799	0.000326	1.1466
3	0.689771	0.000779	0.000318	1.1466
4	0.690861	0.001475	0.000602	1.1466
5	0.685004	0.000993	0.000405	1.1466
6	0.686358	0.000901	0.000368	1.1466
alle	0.687853	0.002232	0.000372	1.1466
Null-LRK-Bedingung				
1	0.687933	0.000840	0.000343	1.1466
2	0.684813	0.000684	0.000279	1.1466
3	0.688259	0.000187	0.000076	1.1466
4	0.689173	0.001317	0.000538	1.1466
5	0.686334	0.000353	0.000144	1.1466
6	0.687793	0.001007	0.000411	1.1466
alle	0.687384	0.001633	0.000272	1.1466
positive-LRK-Bedingung				
1	0.689473	0.001489	0.000608	1.1466
2	0.685741	0.001390	0.000567	1.1466
3	0.688336	0.000925	0.000378	1.1466
4	0.690592	0.002058	0.000840	1.1466
5	0.687741	0.000858	0.000350	1.1466
6	0.688319	0.000669	0.000273	1.1466
alle	0.688367	0.001949	0.000325	1.1466

^a Versuchspersonennummer

A.7 Experiment III - Strukturiertes Interview

Fragen und Antworten des abschließenden strukturierten Interviews. Die Antworten wurden vom Versuchsleiter notiert und die Notizen für eventuelle Korrekturen der Versuchsperson rückgemeldet. Falls Teile der gegebenen Antworten unklar waren, wurde spezifisch nachgefragt. Dies ist in den Antwortprotokollen vermerkt.

VPn	Antwort
Ist Ihnen während des Bearbeitens des Experiments etwas aufgefallen?	
1 GDEDOM	Die Aufmerksamkeit schwindet so ein bisschen, sodass man manchmal etwas angeklickt hat und gleichzeitig aber dachte, z.B. es ist grün und nicht rot.
2 NEKLHM	Dass es mir von Termin zu Termin leichter fiel. Die ersten Male fand ich es sehr anstrengend, die letzten Male ging es immer besser
3 PHMBRM	Oben am Quadrat waren immer mal wieder oben oder unten rote Ränder Beim längeren hinsehen war beinahe dreidimensional eine Kugel in dem Quadrat drin
4 PBNSEB	nee, außer dass es mir relativ oft gleich vorkam – es geht um die Reihenfolge der Farben mit Ton, die schien innerhalb eines Termins immer gleich zu sein (z. B. beim ersten Block die erste ist so ähnlich wie beim 2. Block die erste).
5 RPEKEW	Immer beim Knackton war das Kästchen eher grau. -> später im Durchgang
6 TGEKIM	Dass das 3. & 4. Mal / Termin schneller war und dass die Reihenfolge der Farben sich verändert hat. -> von Durchgang zu Durchgang.
7 VBNSUB	Ich habe das Gefühl, dass das Viereck nicht überall die gleiche Farbe hat bzw. nicht gleich ausgeleuchtet ist ... das kann aber auch vom Bildschirm kommen.
8 ZMEEAA	Durchgänge waren unterschiedlich lang. Am Anfang war immer ganz klar, was rot oder grün war (so die ersten vier male) und dann wurde es schwieriger.
9 RNULAU	Ja, und zwar am Anfang (nach der kleinen Pause) waren die Farben mit Ton immer eindeutiger zuzuordnen als gegen Ende hin. Es war sehr anstrengend und dadurch demotivierend => zu lang Die Farben ohne Ton konnte man immer gut erkennen.

VPn	Antwort
Wie haben Sie die Aufgabe (zu beurteilen, ob die gemeinsam mit dem Ton präsentierte Farbe rot oder grün ist) bearbeitet?	
1 GDEDOM	bei den Grautönen [:] meistens habe ich geschaut, ob es eher eine kalte oder eine warme Farbe ist. Kalt -> grün, warm -> rot
2 NEKLHM	Ich habe einfach nur geschaut ob es für mich rot oder grün ist. Immer dann wenn es nicht eindeutig war, habe ich nach kalt oder warm gesehen war es für mich auch nur warm oder kalt. Warm war dann rot und kalt grün. War dann, wenn es helle oder blasse Farben waren.
3 PHMBRM	Eigentlich ganz unbewusst, ich habe eigentlich recht schnell gesehen, ob es rot oder grün ist und dann die Pfeiltasten benutzt.
4 PBNSEB	zum Ende des Versuchs kam es mir eher weiß vor, da habe ich überlegt, ob es eher ein rötliches oder ein grünliches ist.
5 RPEKEW	Ich habe immer spontan, was ich zuerst empfunden habe draufgedrückt
6 TGEKIM	Auf Kästchen geguckt und auf Farbe gedrückt, von der ich dachte, dass sie dem Kästchen eher entsprechen könnte.
7 VBNSUB	Wenn es eher grün erschien, bzw. mit dem was ich unter grün verstehe überein stimmte, hab ich grün gedrückt ... oder eben so mit rot ... da es generell eher grau war ... schwierig
8 ZMEEAA	Wenn es nicht eindeutig war, habe ich geschaut ob es eher bräunlich oder bläulich war und es dann als rot (bräunlich) bzw. grün (bläulich) beurteilt. Wenn es fast weiß erschien, wurden Aspekte gesucht, ob es eher rosa (-> zu rot) war, oder bläulich (-> zu grün). Am Anfang des Durchgangs habe ich mich auf grün oder rot konzentriert, aber wenn es nicht eindeutig war, habe ich versucht nach Nachbarfarben Ausschau zu halten.
9 RNULAU	Sobald der Ton kam habe ich die Farbe gesehen und dann rechts für grün oder links für rot gedrückt.

VPn	Antwort
-----	---------

Vergleich der Durchgänge: Gab es Ihrer Meinung nach Unterschiede zwischen den Durchgängen?

1	GDEDOM	Der letzte Durchgang beim dritten Termin war sehr lang, der heute nicht.
2	NEKLHM	Habe ich mich auch schon gefragt. Teilweise kamen sie mir kürzer oder länger vor. Manchmal haben die Farben geblinkt und manchmal haben sie sich intervallmäßiger (oder langsamer) geändert (-> Farben ohne Ton)
3	PHMBRM	Nein. Nichts was mir aufgefallen wäre. Vielleicht, dass einer länger oder kürzer war, worauf ich da nicht die Finger legen würde. Einmal habe ich versucht mitzuzählen aber nach der 2. Runde aufgegeben.
4	PBNSEB	Von der Länge her. <ul style="list-style-type: none"> • Reihenfolge der Item die dargeboten wurden. • Die zu bestimmenden Farben waren unterschiedlich. Ein Durchgang begann mit Rot, einer mit Grün beispielsweise.
5	RPEKEW	<ul style="list-style-type: none"> • Manche waren ein wenig kürzer, manche ziemlich lang. • Sonst nichts.
6	TGEKIM	Die Länge der Durchgänge und die Änderung der Farbreihenfolge zwischen den Durchgängen
7	VBNSUB	Ich könnte nicht sagen, dass die zeitlich gleich lang waren ... aber ich habe auch kein Muster erkannt ... falls es eins gab.
8	ZMEEAA	Nur von der Zeit her. Manche waren sehr lang, andere kurz. Die Reihenfolge der mit d. Ton präsentierten Farben variierten zwischen den Durchgängen.
9	RNULAU	<ul style="list-style-type: none"> • Nein, nichts was mir aufgefallen wäre. Das war relativ gleich. Dass man nach der kleinen Pause die Farben mit Ton relativ stärker sehen konnte war jedes mal so.

VPn	Antwort
Wohin haben Sie beim Betrachten der mit dem Ton gemeinsam präsentierten Farbfelder geschaut?	
1 GDEDOM	in die Mitte des Quadrats
2 NEKLHM	genau auf das Viereck. In die Mitte
3 PHMBRM	Auf das Quadrat, auf das Ganze. Ich habe mir keinen bestimmten Punkt ausgesucht.
4 PBNSEB	auf die Mitte des Quadrats. Ich hatte manchmal einen Grauschleier über dem Bild – wie ein Nachbild (in der Mitte des Quadrats, aber ein wenig kleiner)
5 RPEKEW	Auf das Kästchen. Mitten drauf.
6 TGEKIM	In das weiße Kästchen, relativ zentriert
7 VBNSUB	Meistens direkt in die Mitte, manchmal auch ein Bisschen weiter nach oben rechts.
8 ZMEEAA	So gut wie immer in die Mitte des Quadrats.
9 RNULAU	Am Anfang 1. Termin habe ich in die Mitte geschaut und zum Ende des Termins an die Kante eher und bei den folgenden Terminen habe ich immer in die Mitte geschaut.
Haben Sie die ohne Ton präsentierten Felder immer beobachtet?	
1 GDEDOM	Meistens, manchmal wenn man eine halbe Stunde oder so dasitzt dann braucht man kurz Ruhe, dann macht man die Augen kurz zu oder schaut an die Seite
2 NEKLHM	ja immer, aber nicht immer die Farben wahrgenommen, weil das so schnell ging
3 PHMBRM	zu 95% schon. Wenn ich ein Urteil abgegeben habe, habe ich auch die Felder ohne Ton angeschaut.
4 PBNSEB	ja
5 RPEKEW	ja
6 TGEKIM	Meistens ja
7 VBNSUB	ja, aber die waren so schnell, dass ich mir die Abfolge nicht merken konnte.
8 ZMEEAA	nicht immer. Ich habe ab und zu versucht (1-2 (->Urteile -> in jeder Session)) mal ob sich eine andere Farbe ergibt, wenn ich die Augen geschlossen halte -> ergab sich nicht.
9 RNULAU	Nein nicht konkret. Ich habe einfach nur hingeschaut und mich nicht darauf konzentriert, welche Farbe das ist.

VPn Antwort

Haben sich die ohne Ton präsentierten Felder verändert?

1	GDEDOM	mir ist nichts aufgefallen
2	NEKLHM	- [siehe 7b]
3	PHMBRM	ja
4	PBNSEB	da habe ich nicht darauf geachtet, ob sich etwas an der Reihenfolge der Farben geändert hat
5	RPEKEW	ja
6	TGEKIM	ja
7	VBNSUB	ja, die hatten ganz viele verschiedene Farben ☺
8	ZMEEAA	ja
9	RNULAU	-

Falls ja, wann und wie haben sich die ohne Ton präsentierten Felder verändert?

1	GDEDOM	-
2	NEKLHM	Es war nicht immer die selbe Reihenfolge
3	PHMBRM	Am Anfang der Durchgänge waren die Felder (sowohl mit Ton als auch ohne Ton) farbintensiver. Bei denen mit Ton war das deutlicher.
4	PBNSEB	Die Reihenfolge der Farben war nicht jedes Mal gleich, aber was sich geändert hat, weiß ich nicht.
5	RPEKEW	<ul style="list-style-type: none"> • Die ganze Zeit (vor jedem Urteil) • Manchmal habe ich einen roten Rand am Kästchen gesehen (um das gesamte Kästchen)
6	TGEKIM	In der Farbe haben sie sich verändert
7	VBNSUB	Ohne Übergang, z. B. von Rot zu Grün, alle Farben bunt gemischt. Sehr kurze Abstände.
8	ZMEEAA	<ul style="list-style-type: none"> • Gewechselt vor einer Beurteilung • Diese Farben waren nicht alle Farben des Spektrums • Ich kann nicht sagen, ob sich die Reihenfolge zwischen den Durchgängen verändert hat.
9	RNULAU	nichts was auffällig gewesen wäre

VPn	Antwort
Wie schwierig fanden Sie die Aufgabe (zu beurteilen, ob die gemeinsam mit dem Ton präsentierte Farbe rot oder grün ist)?	
1 GDEDOM	unterschiedlich
2 NEKLHM	das erste Mal fand ich es wirklich schwierig, danach nicht mehr, woran das liegt weiß ich nicht. Und auch nur die hellen blassen Farben.
3 PHMBRM	nicht schwierig
4 PBNSEB	schwierig
5 RPEKEW	schwierig
6 TGEKIM	Verständnis nicht schwierig, Aufgabe schon schwierig, weil ich meist weiß sah.
7 VBNSUB	schon sehr schwierig
8 ZMEEAA	sehr schwierig
9 RNULAU	schwer, besonders zum Ende hin.
Worin bestand die Schwierigkeit dieser Aufgabe?	
1 GDEDOM	- am Anfang war es sehr eindeutig. Manche Farben waren so undefinierbar, da musste [man] fast raten - Dauer, man wird müde
2 NEKLHM	Dass es am Ende der Aufgabe immer anstrengender wurde – das Fixieren und entscheiden.
3 PHMBRM	Es war sehr langwierig.
4 PBNSEB	weil es so lange war, sich zu konzentrieren, manchmal kamen dann Flüchtigkeitsfehler. Und dieses weißliche zuzuordnen war auch schwierig.
5 RPEKEW	wenn es am Ende war, habe ich manchmal grün gedrückt und dann überlegt, ob es nicht doch eher rot war. (war manchmal auch umgekehrt, aber öfter so herum).
6 TGEKIM	Das unklar war, ob die Felder einen roten oder grünen Stich haben.
7 VBNSUB	Die ersten 4-5 zu beurteilenden Felder waren einfach, aber danach ... Die Farben zuzuordnen, da der Farbton so schwach war.
8 ZMEEAA	<ul style="list-style-type: none"> • Oftmals habe ich die Farbe nur als weiß wahrgenommen • Konzentration war schwierig, man muss sich anstrengen und darf nicht locker lassen.
9 RNULAU	Ich fand, viele Felder sahen für mich weiß aus.

VPn	Antwort
-----	---------

Gab es zu beurteilende Farben, die nicht zuzuordnen waren?

1	GDEDOM	in der kurzen Zeit ja
2	NEKLHM	ja
3	PHMBRM	ich habe alles zugeordnet
4	PBNSEB	ja, manchmal war es eben nur weiß
5	RPEKEW	ja – grau.
6	TGEKIM	ja
7	VBNSUB	ja
8	ZMEEAA	Ich habe ja alle beurteilt, also jede Farbe sozusagen in einen Kasten gesteckt.
9	RNULAU	ja, das Weiß

Falls ja, was haben Sie in diesen Fällen gemacht?

1	GDEDOM	Manchmal geraten
2	NEKLHM	nichts gedrückt. Das wurde aber immer weniger mit den Terminen.
3	PHMBRM	-> ganz unbewusst, habe ich bei schwierigen manchmal einen Moment länger gezögert, aber keine Strategie verwendet.
4	PBNSEB	dann habe ich trotzdem versucht zuzuordnen. Dann war es eher überlegen, als wissen welche Farbe es war.
5	RPEKEW	intuitiv, spontan, ich habe versucht zu entscheiden und wenn es ganz grau und eher kalt war, habe ich eher grün gedrückt.
6	TGEKIM	Intuitiv entschieden
7	VBNSUB	Trotzdem für eins der beiden entschieden. Ein Bisschen vielleicht abhängig von der Farbe die man vorher gesehen hat oder ob es heller oder dunkler erschien, es gab doch immer einen ganz leichten Trend.
8	ZMEEAA	-
9	RNULAU	intuitiv gedrückt, ich hatte da kein system

Welche Fragestellung haben wir Ihrer Meinung nach untersucht?

1	GDEDOM	<ul style="list-style-type: none"> - Anfangs dachte ich, dass es etwas mit der Aufmerksamkeit zu tun hat - wenn ein undefinierbar war, dass dann die erste Farbe ohne Ton die Lösung angibt
2	NEKLHM	welche Leute eher grün oder eher rot sehen
3	PHMBRM	<ul style="list-style-type: none"> • Einfluss von vorab gezeigten Farbeindrücken unter der Bewusstseinschwelle • Wenn in den vorhergehenden Sequenzen mehr rote Töne waren, würde man sich eher für rot entscheiden, wenn in den vorhergehenden Sequenzen mehr grüne Töne waren würde man sich eher für Grün entscheiden. • Ob in manchen Sequenzen mehr violette oder grüne Töne waren, ist mir nicht aufgefallen.
4	PBNSEB	<ul style="list-style-type: none"> • Farbgrenzen zu bestimmen, was ich mit meinen Augen noch wahrnehmen kann, dass also noch Farben dargeboten wurden, die ich nicht erkennen kann. • Dass es beeinflusst wird von den Farben, die zuvor dargeboten wurden [VL: Wie?] weiß ich nicht
5	RPEKEW	<ul style="list-style-type: none"> • Wie meine Wahrnehmung beeinflusst werden kann, wenn beispielsweise beim / oder kurz vor dem Knackton ein rotes Kästchen ist, dass dieses die Beurteilung des grünen Kästchens beeinflusst (dass man eher rot drückt). -> bei manchen Durchgängen habe ich das auch dann so gemacht. -> Beim 2. Termin über einen Durchgang. Ich habe 2, 3 mal (Knacktönen darauf geachtet, aber dann auch nicht mehr). ansonsten habe ich versucht das spontan zu machen.
6	TGEKIM	Die Wahrnehmung von Farben. Vielleicht in Abhängigkeit vom Hintergrund bzw. Kontrast

VPn	Antwort
7 VBNSUB	Das habe ich mir auch überlegt ... Evtl. ob das was mit dem negativen Nachbild zu tun hat... Die Grenzen zwischen Farben im Perzept. Was man als Rot oder Grün sieht. Vielleicht auch wie variabel diese Grenze ist. Z.B. wenn ich das gleiche zwei Mal gesehen [<i>habe</i>], ob ich beim 2. vielleicht etwas anderes gedrückt habe.
8 ZMEEAA	Ich habe das Gefühl, dass die Farben am Ende eines Durchgangs immer weiß waren, aber die Farben davor das Auge manipuliert haben / so darauf eingestellt haben, dass man entweder rot oder grün gesehen hat, man also zu einer Entscheidung kommt -> genaue Zuordnung von Reihenfolge zu Entscheidung war nicht möglich. -> keine Hypothese darüber ob diese Manipulation zwischen oder innerhalb eines Durchgangs erfolgt, ich nehme an, dass sie permanent da war.
9 RNULAU	Es ging ja eigentlich um die Grenzen der Wahrnehmung. Aber ich denke es ging eher darum, wie gut man durchhält und wie man sich an eine Aufgabe gewöhnt.

A.8 Experiment III - Deskriptiv statistische Ergebnisse pro Versuchsperson und Bedingung

Versuchsperson	$M(I)$	$SD(I)$	$SEM(I)$	s
Null-LRK-Bedingung				
1 (GDEDOM)	0.687941	0.001036	0.000259	1.146600
2 (NEKLHM)	0.685525	0.001282	0.000321	1.146600
3 (PHMBRM)	0.686670	0.000786	0.000196	1.146600
4 (PBNSEB)	0.686350	0.001149	0.000287	1.146600
5 (RPEKEW)	0.686065	0.001469	0.000367	1.146600
6 (TGEKIM)	0.687922	0.003112	0.000778	1.146600
7 (VBNSUB)	0.688002	0.001272	0.000318	1.146600
8 (ZMEEEA)	0.685816	0.001894	0.000473	1.146600
9 (RNULAU)	0.693158	0.004056	0.001014	1.146600
alle(Teilnehmer 1 bis 8)	0.686787	0.001868	0.000165	1.146600
negative-LRK-Bedingung				
1 (GDEDOM)	0.689185	0.001003	0.000251	1.146600
2 (NEKLHM)	0.686707	0.001299	0.000325	1.146600
3 (PHMBRM)	0.686928	0.001092	0.000273	1.146600
4 (PBNSEB)	0.686374	0.002520	0.000630	1.146600
5 (RPEKEW)	0.686194	0.001265	0.000316	1.146600
6 (TGEKIM)	0.689107	0.001997	0.000499	1.146600
7 (VBNSUB)	0.688504	0.001422	0.000355	1.146600
8 (ZMEEEA)	0.685008	0.001196	0.000299	1.146600
9 (RNULAU)	0.692211	0.003653	0.000913	1.146600
alle(Teilnehmer 1 bis 8)	0.687251	0.002074	0.000183	1.146600
positive-LRK-Bedingung				
1 (GDEDOM)	0.689673	0.001234	0.000308	1.146600
2 (NEKLHM)	0.686834	0.001095	0.000274	1.146600
3 (PHMBRM)	0.688135	0.001435	0.000359	1.146600
4 (PBNSEB)	0.687375	0.001649	0.000412	1.146600
5 (RPEKEW)	0.687063	0.002106	0.000527	1.146600
6 (TGEKIM)	0.690603	0.003560	0.000890	1.146600
7 (VBNSUB)	0.688993	0.000844	0.000211	1.146600
8 (ZMEEEA)	0.687216	0.001023	0.000256	1.146600
9 (RNULAU)	0.693438	0.006200	0.001550	1.146600
alle(Teilnehmer 1 bis 8)	0.688237	0.002191	0.000194	1.146600

A.9 Experiment III Versuchspersonenausschluss

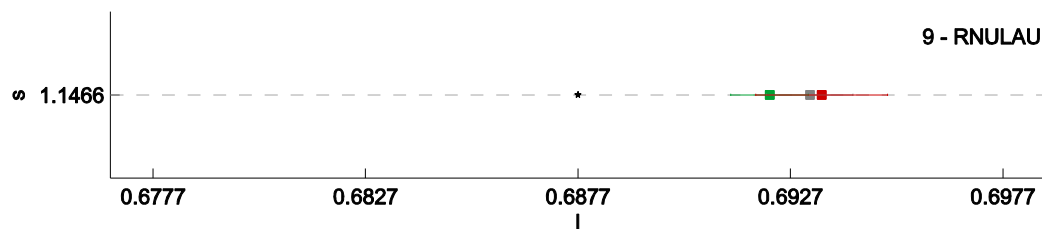


Abbildung A.9a: Experiment III. Ergebnisse für Versuchsperson 9. Mittelwerte und Standardfehler des Mittelwerts für die positive-Korrelations-Bedingung (rot), negative-Korrelations-Bedingung (grün) und Null-Korrelations-Bedingung (grau).

Tabelle A.9: Anzahl der notwendigen Klassifikationen, bis das Abbruchkriterium erreicht war.

VPnr	Nr	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>M</i>	<i>sd</i>	<i>Md</i>
1	48	17	110	56.10	24.48	60.5
2	48	21	83	37.10	13.15	34.5
3	48	21	64	42.00	12.27	41.5
4	48	24	104	51.15	18.62	48.5
5	48	21	96	43.79	17.99	39.0
6	48	18	175	70.17	33.81	62.0
7	48	23	77	39.38	14.52	35.0
8	48	21	88	48.88	18.82	44.5
9	48	19	318	108.38	57.41	106.5
alle VPn	432	17	318	55.22	34.11	44.0
VPn 1:8	432	17	175	48.57	22.51	42.0

VPnr	Versuchspersonennummer
Nr	Anzahl der bearbeiteten Durchgänge
min	Minimale Anzahl benötigter Klassifikationen innerhalb eines Durchgangs
max	Maximale Anzahl benötigter Klassifikationen innerhalb eines Durchgangs
M	Mittlere Klassifikationsanzahl
Md	Median benötigter Klassifikationen

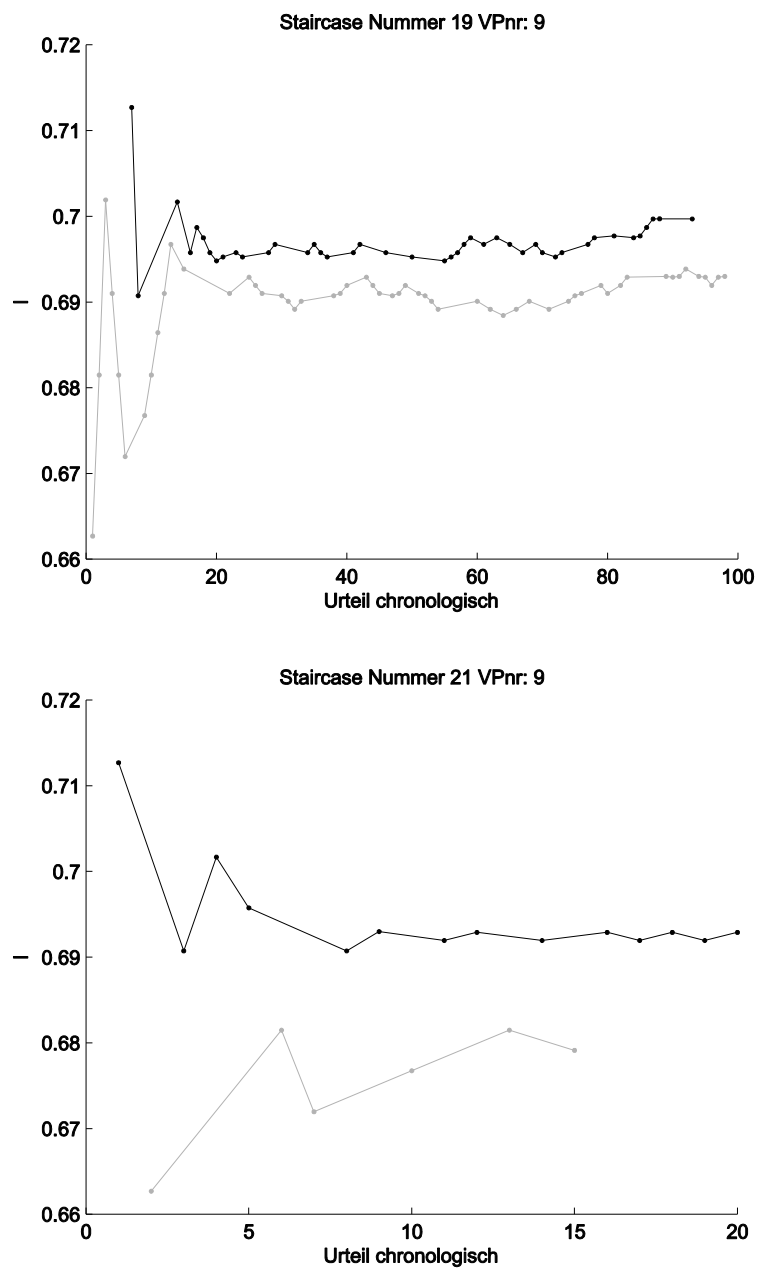
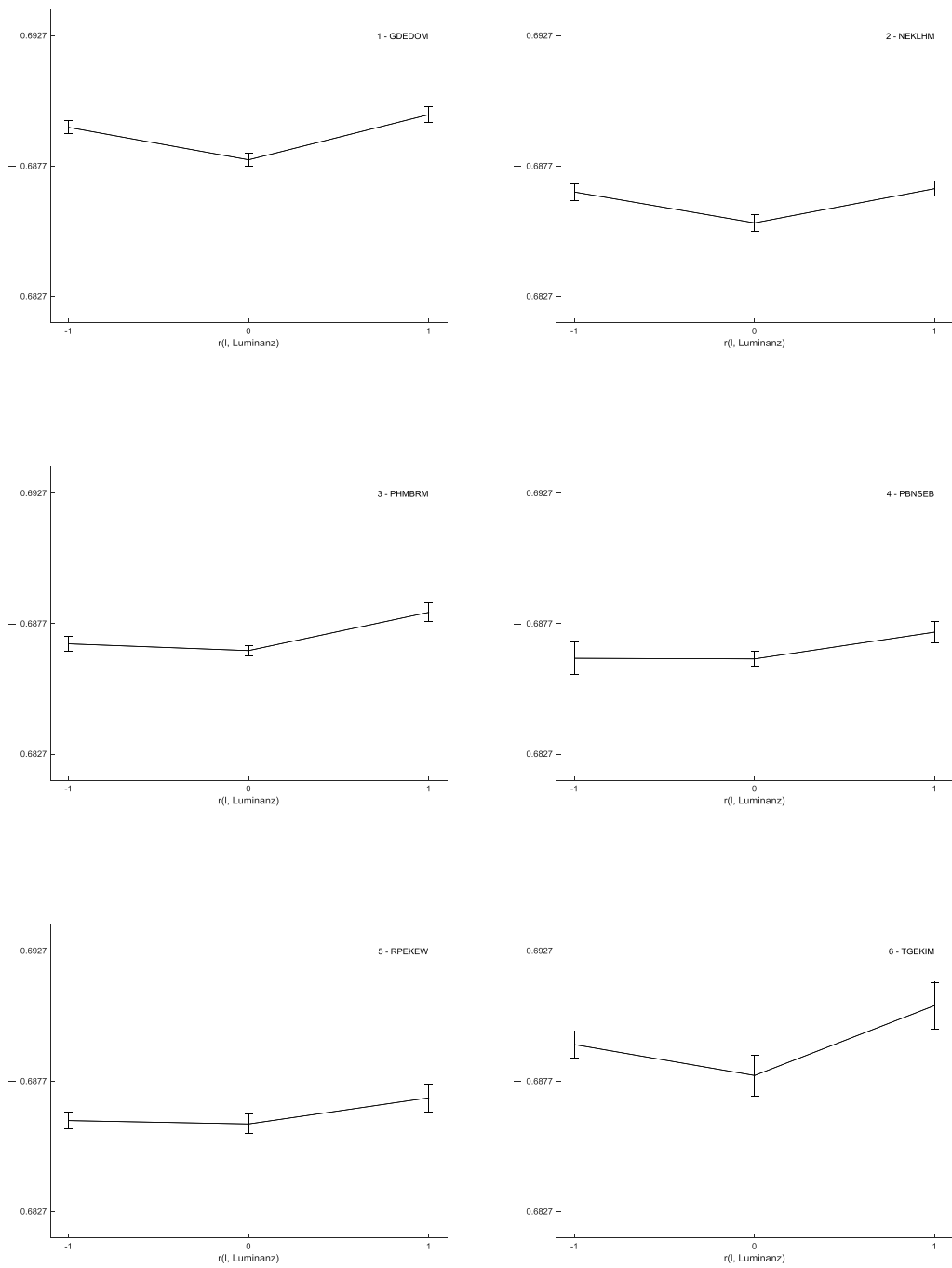


Abbildung A.9b: Exemplarische Verläufe der Treppen in zwei Durchgängen (Staircases).
Die Abbildungen zeigen deutlich, dass die Treppen nicht fusionieren.

A.10. Alternative Ergebnisdarstellung für *Experiment III*



f.

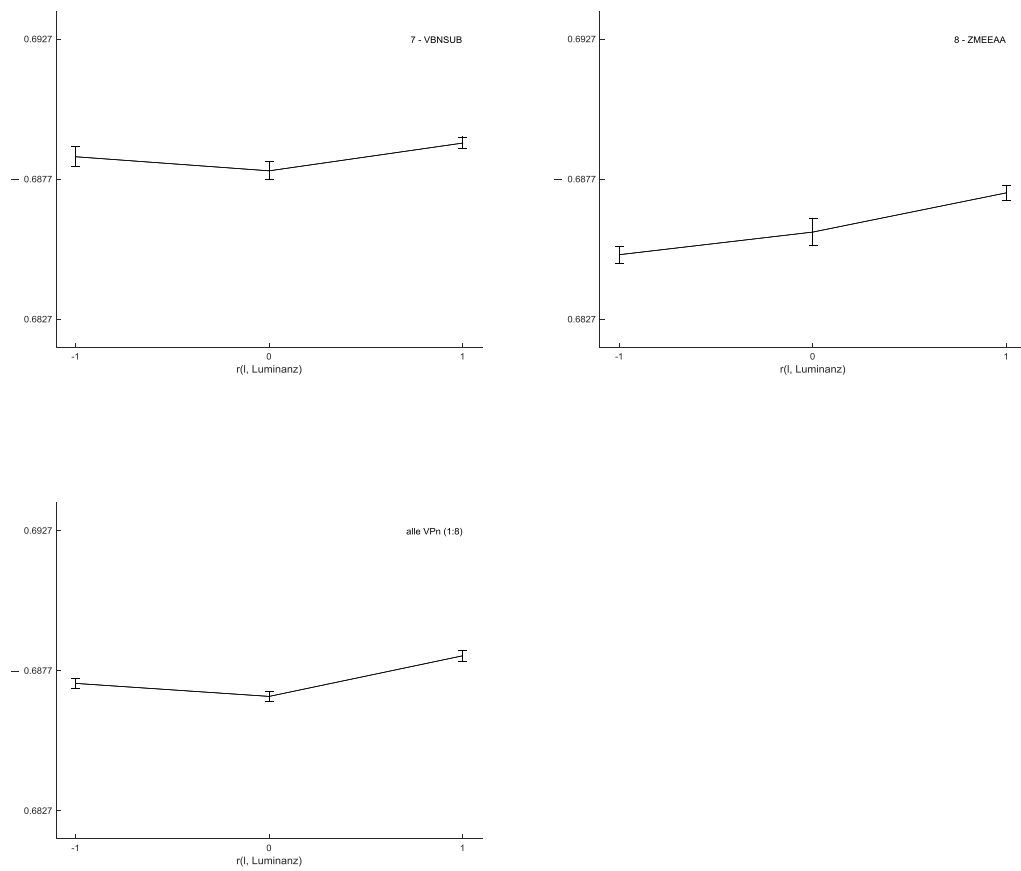


Abbildung A.10: Experiment III. Deskriptive Ergebnisse. Darstellung der Farbkategorien-
grenze (M , SEM) in Abhängigkeit von der Luminanz-Rötlichkeits-Korrelation.

Anhang B

B.1 Vorexperiment I

Vorexperiment I. Dieses Experiment dient der Messung der Grenze zwischen 2 Farbkategorien zu verschiedenen Präsentationszeitpunkten. Dabei werden die Farben eines grünlichen Stimulusfarbensets nacheinander gezeigt, gefolgt von den Farben eines rötlichen Stimulusfarbensets. Die Präsentation der vollständigen Stimulusfarbensets schließt stetig aneinander an, sodass es beim Betrachter zu einer oszillierenden Adaptation an das rötlich und das grünliche Stimulusfarbenset kommen soll. Der perzeptuelle Zustand wird anhand der Bestimmung der Grenze zwischen den Farbkategorien Rot und Grün – in diesem Experiment umgesetzt durch eine adaptive Methode – festgestellt. Die hier verwendete Staircase-Methode erlaubte es, eine Grenze zwischen zwei Farbkategorien effizient zu messen, ohne dass Vorwissen über deren Lage im Farbraum gegeben sein musste. Die Staircase-Methode, die hier eingesetzt wurde, entspricht der zur Untersuchung der *Forschungsfrage I* verwendeten, auf die für detaillierte Angaben zu dieser Prozedur verwiesen wird. Im Folgenden wird daher nur ein kompakter Überblick gegeben. Die hier verwendete Staircase-Prozedur beinhaltet zwei Treppen, die jeweils an den gegenüberliegenden Enden einer Strecke im MacLeod-Boynton Farbraum beginnen ($LL_l = 0.670$, $LL_s = 1.1466$, $LL_{Luminanz} = 85$; $UL_l = 0.712$, $UL_s = 1.1466$, $UL_{Luminanz} = 85$), entlang der die Testfarben wiederum ausgewählt werden. Welche Treppe zu einem Testzeitpunkt präsentiert wurde, wurde zufällig entschieden. Die Auswahl der Testfarbe basiert auf der zufällig gewählten Treppe und deren aktueller Richtung sowie der Schrittgröße. Die Richtung einer Treppe ist die Richtung entlang der Strecke, in der die nächste Testfarbe gewählt wird. Diese Richtung wechselt jedes Mal, wenn die Richtung der Reaktion der Versuchsperson auf eine Testfarbe dieser Treppe wechselt. Mit jedem Richtungswechsel wurde die Schrittgröße dieser Treppe halbiert. Die Schrittgröße beschreibt die Distanz zwischen der letzten präsentierten Testfarbe und der aktuellen Testfarbe einer Treppe mit Hilfe der Anzahl unterschiedlich darstellbarer Farben, die auf dieser Strecke liegen. Das Abbruchkriterium wurde erreicht, wenn fünf sukzessive Messungen innerhalb der Distanz von zwei darstellbaren Farben in jeder Richtung gemacht wurden, die Versuchsperson in ihren Urteilen folglich immer innerhalb eines engen Bereichs pendelte. Zur Schätzung der Grenze zwischen Rot und Grün wurde der Mittelwert der Datenpunkte im Abbruchintervall berechnet. Die Aufgabe der Teilnehmer war alle Farben sorgfältig zu beobachten und zu entscheiden, ob die Testfarbe, die mit Hilfe eines Tons markiert war, Rot oder Grün ist. Die Testfarbe wurde 1500 ms dargestellt.

Tabelle B.1.1 Verteilungseigenschaften für die Stimulusfarbensets, die in *Vorexperiment I* und *II* verwendet wurden. Wird nur ein Wert angegeben, gilt dieser für beide Displayfarbensets

Statistische Kennwerte	Stimulusfarbenset	
$M(l)$	Grün: 0.67	Rot: 0.712
$M(s)$	1.1466	
$M(\text{Luminanz})$	85	
$SD(l)$	0.005	
$SD(s)$	0.1536	
$SD(\text{Luminanz})$	5	
Korrelation $r(l, \text{Luminanz})$	0	
Korrelation $r(s, \text{Luminanz})$	-0.1153	
Korrelation $r(l, s)$	-0.2133	
Beschreibung der in Vorexperiment I verwendeten Stimulusfarbensets		
Anzahl Stimulusfarben	61	61
Verteilung l -Werte	annähernd nv.*	annähernd nv.
Verteilung s -Werte	annähernd nv.	annähernd nv.
Verteilung Luminanz -Werte	annähernd nv.	annähernd nv.
Beschreibung der in Vorexperiment II verwendeten Stimulusfarbensets		
Anzahl Stimulusfarben	41	41
Verteilung l -Werte	annähernd nv.	annähernd nv.
Verteilung s -Werte	annähernd nv.	annähernd nv.
Verteilung Luminanz -Werte	annähernd nv.	annähernd nv.

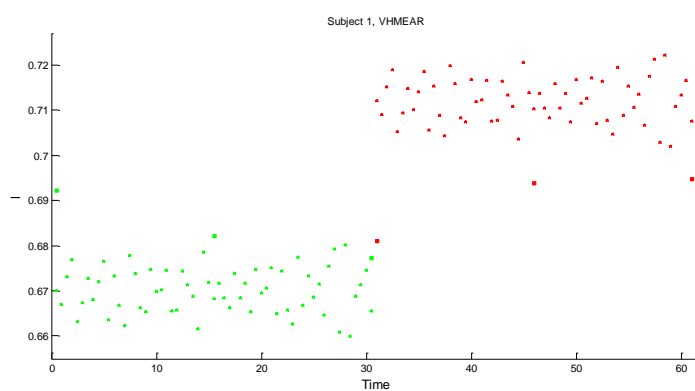
* nv. normalverteilt

In der ersten Vorstudie wurde die Präsentationslänge eines Stimulusfarbensets (Tabelle B.1.1) auf 30.5s festgelegt. Innerhalb dieser Zeit wurden 61 Stimulusfarben präsentiert, sodass die Präsentationsdauer einer Einzelfarbe 500 ms betrug. Hierzu wurden 30 Farbwerte zufällig gezogen und am Mittelwert jeder der drei Ebenen punktgespiegelt. Darüber hinaus wurde als erste dargestellte Farbe der Mittelwert des Stimulusfarbensets hinzugefügt, um einen Messzeitpunkt direkt nach der Präsentation der ersten Farbe des Stimulusfarbensets einfügen zu können. Messzeitpunkte wurden nach der ersten Stimulusfarbe (500 ms) eines Stimulusfarbensets, nach der 31. Stimulusfarbe (15500 ms) sowie nach der letzten Farbe eines Stimulusfarbensets (30500 ms) eingefügt. Innerhalb eines Zyklus wurde nur ein Datenpunkt erhoben, um Auswirkungen der Testfarbe auf die nächste Messung zu vermeiden. Zudem wurde innerhalb

eines Durchgangs nur ein Messzeitpunkt erhoben. Jeder der 6 Messzeitpunkte wurde zweimal gemessen, wobei der Mittelwert dieser beiden Messungen als Ergebnis verwendet wurde.

An diesem Vorxperiment nahmen zwei Versuchspersonen teil, beide waren über das Ziel des Experiments informiert. Versuchsperson 2 ist die Autorin. Abbildung B.1.1 zeigt die Ergebnisse der beiden Teilnehmer.

Versuchsperson 1



Versuchsperson 2

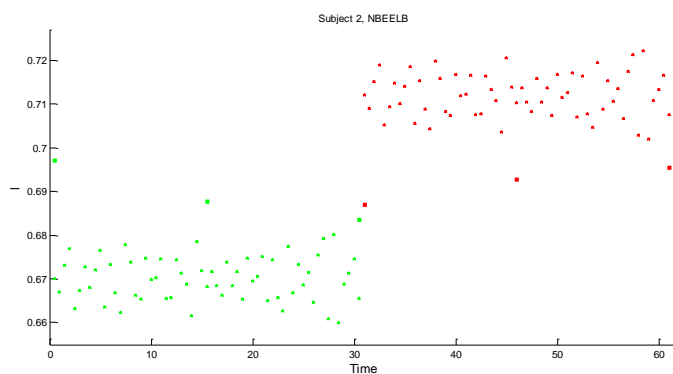


Abbildung B.1.1. Ergebnisse von *Vorstudie I*. Es werden die präsentierten Stimulusfarben im Verlauf eines Zyklus für das grüne (grüne Punkte) und das rote Displayfarbset (rote Punkte) abgebildet. Die roten und grünen Quadrate zeigen die durch die Mittelwerte geschätzte Grenze zwischen Rot und Grün des jeweiligen Messzeitpunkts (rote bzw. grüne Quadrate).

Die Ergebnisse (Tabelle B.1.2) zeigen, dass sich die Grenze zwischen den Farbkategorien Rot und Grün mit der Zeit in Richtung des Mittelwertes des momentan dargestellten Stimulusfarbensets verschiebt. Wie erwartet zeigen die Daten eine Annäherung an die erwarteten Mittelwerte und unterstützen somit die erwartete Oszillation. Nach 15.5 s ist eine vollständige Verschiebung noch nicht erreicht. Obwohl die Grenze in Richtung des Mittelwerts des Stimulusfarbensets verschoben wird, erreicht sie diesen nicht vollständig. Um einen substantiellen Unterschied zwischen den Adaptationsmaxima zu erhalten, die Präsentationsdauer hingegen auf einem akzeptablen Niveau zu halten, wurde für die nächsten Vorstudien eine Präsentationsdauer von 20.5 s gewählt.

Tabelle B.1.2: Mittelwerte und Standardabweichungen der geschätzten Farbkategoriegrenzen zwischen Rot und Grün für die sechs Messzeitpunkte in *Vorexperiment I*. Alle Werte werden in MacLeod-Boynton Farbraum präsentiert. *s*-Werte und Luminanzwerte waren konstant.

Daten für Versuchsperson 1 (VHMEAR)				
Messzeitpunkt	<i>M (I)</i>	<i>SD (I)</i>	<i>s</i>	<i>LUM</i>
Messzeitpunkte innerhalb der Präsentation des grünen Stimulusfarbensets				
1 (500 ms)	0.6921	0.000547	1.1466	85
31 (15500 ms)	0.6821	0.003321	1.1466	85
61 (30500ms)	0.6772	0	1.1466	85
Messzeitpunkte innerhalb der Präsentation des roten Stimulusfarbensets				
1 (500 ms)	0.6810	0.004386	1.1466	85
31 (15500 ms)	0.6937	0.005498	1.1466	85
61 (30500ms)	0.6948	0.003738	1.1466	85
Daten für Versuchsperson 2 (NBEELB)				
Messzeitpunkt	<i>M (I)</i>	<i>SD (I)</i>	<i>s</i>	<i>LUM</i>
Messzeitpunkte innerhalb der Präsentation des grünen Stimulusfarbensets				
1 (500 ms)	0.6969	0.001282	1.1466	85
31 (15500 ms)	0.6877	0.000281	1.1466	85
61 (30500 ms)	0.6834	0.002138	1.1466	85
Messzeitpunkte innerhalb der Präsentation des roten Stimulusfarbensets				
1 (500 ms)	0.6869	0.000384	1.1466	85
31 (15500 ms)	0.6927	0.003837	1.1466	85
61 (30500 ms)	0.6955	0.000345	1.1466	85
<i>LUM</i> Luminanz				

B.2 Vorexperiment II

Vorexperiment II. Ziel des zweiten Vorexperiments ist die Reduktion des Stimulusfarbensets auf eine Dauer von 20.5 s pro Intervall und dessen Angemessenheit zu prüfen. Mit der Reduktion des Darstellungsintervalls geht eine Reduktion der Anzahl der Farben eines Stimulusfarbensets einher. Die Untersuchung, ob beide Veränderungen einen Einfluss auf die Grenze zwischen Rot und Grün haben, wird im nächsten Abschnitt untersucht. *Vorexperiment II* verwendete die gleiche Experimentalmethodik wie *Vorexperiment I*. Die Staircase Bedingungen wurden von *Vorexperiment I* übernommen, ebenso die Präsentationsdauer der Stimulusfarben (jeweils 500 ms) und der Testfarben (1500 ms). Jedoch wurden die Messzeitpunkte, die Anzahl der Stimulusfarben pro Set und aufgrund einer neuen Ziehung der Stimulusfarbensets die einzelnen Farbwerte der Stimulusfarben verändert. Die vier Messzeitpunkte wurden nach der Präsentation der ersten Stimulusfarbe eines Sets (500 ms) sowie nach der letzten Stimulusfarbe eines Sets (20500 ms) festgelegt. Jedes der beiden ausgewählten Stimulusfarbensets beinhaltet 41 Farben, die Mittelwerte und Verteilungseigenschaften wurden von *Vorexperiment I* (Tabelle B.1.1) übernommen. Daher bestand jedes Set ebenfalls aus 20 zufällig gezogenen Farben und deren Punktspiegelungen am Mittelwert. Diesen 40 Farben wurde die Präsentation des Mittelwerts des Sets vorangestellt. Die Messzeitpunkte wurden auf das Ende jedes Stimulusfarbensets sowie nach der Präsentation der ersten Farbe eines Stimulusfarbensets gelegt. Innerhalb eines Zyklus wurde nur eine Messung gemacht. Einer der Teilnehmer aus *Vorexperiment I* nahm an *Vorexperiment II* teil.

Die Ergebnisse zeigen einen leicht größeren Abstand zwischen den Adaptationsmaxima von Rot und Grün, im Vergleich zu den Messzeitpunkten bei 1550 ms in *Vorexperiment I*. Tabelle B.2 zeigt die Ergebnisse von *Vorexperiment II*. Aufgrund dieser Ergebnisse wird eine Veränderung der Mittelwerte überlegt, mit dem Ziel die Verschiebung der Grenze zwischen Rot und Grün zu vergrößern.

Tabelle B.2 Ergebnisse *Vorexperiment II*.

Messzeitpunkte während der Präsentation des grünen Stimulusfarbensets	
1 (500 ms)	$I = 0.6979$, $s = 1.1466$, <i>Luminanz</i> = 85
41 (20500 ms)	$I = 0.6909$, $s = 1.1466$, <i>Luminanz</i> = 85
Messzeitpunkte während der Präsentation des roten Stimulusfarbensets	
1 (500 ms)	$I = 0.6899$, $s = 1.1466$, <i>Luminanz</i> = 85
41 (20500 ms)	$I = 0.6968$, $s = 1.1466$, <i>Luminanz</i> = 85

B.3 Vorexperiment III

Untersuchung der Wirkung extremerer Mittelwerte eines Stimulusfarbensets. Während der Präsentation eines Stimulusfarbensets verschiebt sich die Grenze zwischen den gemessenen Farbkategorien in Richtung des Mittelwertes des dargestellten Stimulusfarbensets. Eine Veränderung der Distanz der beiden Stimulusfarbensets im Farbraum könnte sich ebenfalls auf die Oszillation der Grenze zwischen zwei Farben auswirken. Um dies zu untersuchen, wurde *Vorexperiment III* gemacht. Diese Studie übernimmt das Paradigma und die Parameter von *Vorexperiment II*, jedoch werden die Mittelwerte der Stimulusfarbensets verändert, weshalb neue zufällig gezogene Stimulusfarbensets erstellt wurden. Die Mittelwerte der Stimulusfarbensets wurden um eine Standardabweichung auf der I -Achse in Richtung rot oder grün verschoben, sodass neue Mittelwerte für das grüne Stimulusfarbenset ($I = 0.655$, $s = 1.1466$, $Luminanz = 85$) und das rote Stimulusfarbenset ($I = 0.717$, $s = 1.1466$, $Luminanz = 85$) entstanden. Messzeitpunkte der Staircaseprozedur wurden jeweils nach der Präsentation der ersten Farbe eines Stimulusfarbensets sowie nach der Präsentation der letzten Farben eines Stimulusfarbensets gesetzt. Innerhalb eines Zyklus wurde weiterhin nur ein Datenpunkt erhoben.

Die Daten (Tabelle B.3) zeigen eine Vergrößerung der Verschiebung der Grenze zwischen Rot und Grün. Diese Vergrößerung entspricht nicht der maximalen Verschiebung der Grenze nach 30.5s in *Vorexperiment I*, jedoch wurde eine hinreichende Verschiebung der Grenze festgestellt. Von der Wahl noch weiter auseinander liegender Stimulusfarbensets wurde zudem abgesehen, um zu vermeiden, dass der Integrationsprozess zu steil wird und daher kleine Effekte im Vergleich der Bedingungen nicht mehr adäquat abgebildet werden können.

Tabelle B.3 Ergebnisse aus *Vorexperiment III*.

	Messzeitpunkt [ms]	Anzahl Messungen	$M(I)$
Stimulusset Grün			
	500	2	0.698064
	20500	2	0.68927
Stimulusset Rot			
	500	2	0.689465
	20500	2	0.698085

B.4 Variabilität im Stimulusfarbenset

Variabilität des Stimulusfarbensets. Da die bisherigen Vorexperimente zwei Faktoren gleichzeitig variiert haben, nämlich die Anzahl der Stimulusfarben sowie die Gesamtdauer der Präsentation, soll in *Vorexperiment IV* der Einfluss dieser beiden Faktoren auf die Grenze zwischen Rot und Grün getrennt untersucht werden.

Die Variabilität des Stimulusfarbensets, sprich die Anzahl der Stimulusfarben, könnte ein einflussreicher Faktor für die Schätzung der Beleuchtung sein, da eine zunehmende Anzahl verschiedener Informationen die Präzision der Schätzung verbessern sollte. Der Einfluss einer einzelnen Farbinformation auf den Beleuchtungsschätzungsprozess verringert sich mit steigender Anzahl verfügbarer Informationen.

Zur Untersuchung dieser Frage wurden die Dauer der Informationspräsentation, operationalisiert durch den Messzeitpunkt im Darbietungszyklus und die Informationsvariabilität, operationalisiert durch die Anzahl verschiedener präsentierter Farben, variiert. Erhoben wurde mit Hilfe des gleichen Paradigmas, das auch in den drei vorhergehenden Vorexperimenten zur Anwendung kam. Es bestand aus einem Rot-Grün Integrationszyklus, wobei jede Integrationsphase 20 s dauerte. Für die Rot Integrationsphase wurde im Mittel an einen rötlichen Wert adaptiert ($M_I = 0.712$, $M_s = 1.1466$, $M_{Luminanz} = 85$; $SD(I) = 0.005$, $SD(s) = 0.1536$, $SD(Luminanz) = 5.0$; $corr(I, Luminanz) = 0$, $corr(s, Luminanz) = -0.1153$, $corr(I, s) = -0.2133$), sodass die Annahme einer rötlichen Beleuchtung nahe liegt, in der Grün-Integrationsphase wurde konstant nur eine grünliche Farbe ($I = 0.67$, $s = 1.1466$, $Luminanz = 85$) gezeigt. Gemessen wurde mit Hilfe des Staircase-Paradigmas der Grad der Oszillation in Richtung des rötlichen Maximums. Die Informationsvariabilität wurde auf vier Stufen variiert, die Integrationsdauer auf fünf Stufen. Sofern die Integrationsdauer unter 20 s lag, wurde die verbleibende Zeit bis zum Integrationsende mit der Darbietung des Mittelwerts des roten Displayfarbensets gefüllt. Abbildung B.4.1 verdeutlicht den Versuchsplan.

Mit Hilfe einer Klassifikationsaufgabe, eingebunden in ein 2AFC-Doppel-Staircase Paradigma, wurde die Grenze zwischen Rot und Grün als Operationalisierung des neutralen Punktes zwischen Rot und Grün gemessen. Als Abbruchkriterium wurden fünf gültige Klassifikationen im Bereich von 2 darstellbaren Farben beiderseits des Mittels genommen. Für jede Bedingung wurden zwei Messungen durchgeführt. Die Versuchsanweisung wurde schriftlich dargeboten, mit gedanklicher Rekapitulation nach der Dunkelgewöhnungsphase. Versuchsperson war die Autorin.

Setgröße	Dauer				
	1000	2500	5000	10000	20000
1					
10					
20					
50	—				

Abbildung B.4.1. Versuchsplan für *Vorexperiment IV*. Von der Bedingungskombination von 50 verschiedenen Displayfarben die innerhalb von 1 s dargestellt werden, wurde aus technischen Gründen abgesehen.

Ergebnisse. Die Ergebnisse in Abbildung B.4.2a und b zeigen insgesamt kleine Effekte. Bemerkenswert ist eine zunehmende Rötlichkeit des neutralen Punktes mit zunehmender Dauer der Informationspräsentation. Hingegen verwundert es, dass eine Zunahme der Variabilität der integrierten Information nicht zu einer stärkeren Annäherung der Schätzung an die verwendete mittlere Rötlichkeit führt.

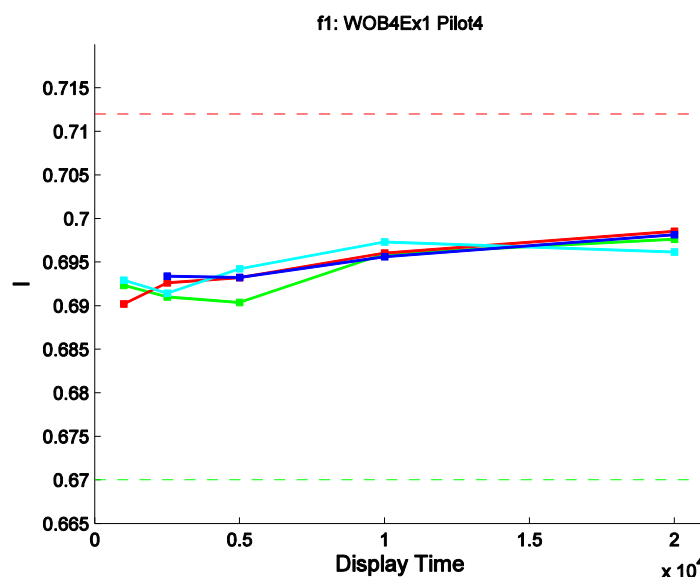


Abbildung B.4.a Effekt der Darbietungszeit. Die Linien geben die Anzahl der präsentierten Farben an (1 Farbe (grün), 10 Farben (rot), 20 Farben (cyan), 50 Farben (blau)). Erkennbar ist für alle untersuchten Anzahlen an Farben eine Verschiebung der Farbkategorieengrenze in Richtung des roten Stimulusfarbensets in Abhängigkeit von der Präsentationsdauer.

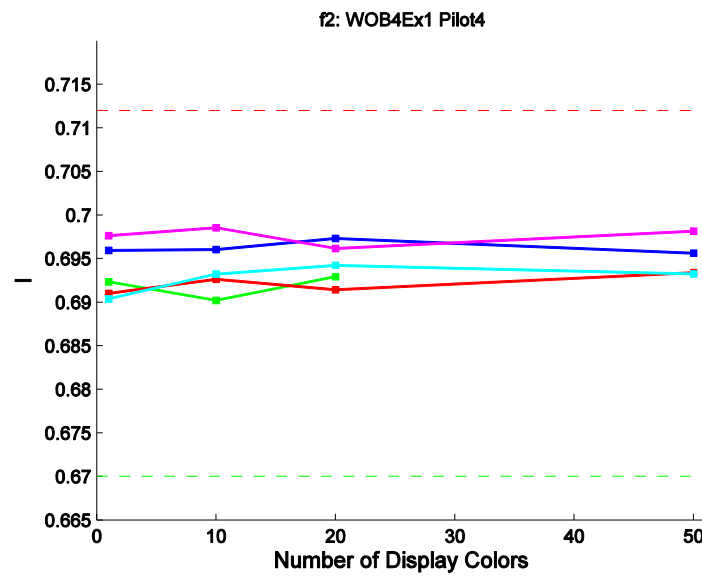


Abbildung B.4.b: Verschiebung der Farbkategoriengrenze in Abhängigkeit von der Stimulusdauer, für die fünf verschiedenen Darbietungsdauern (1000 ms (grün), 2500 ms (rot), 5000 ms (cyan), 10000 ms (blau), 20000 ms (magenta)).

B.5 Testfarbenset, ausgewählte Testfarben

IV	<i>I</i>	<i>s</i>	<i>Lum*</i>	R	G	B	IV-UG (>=)	IV-OG (<=)
2	0.673664	1.1466	85	144	183	191	0.6715	0.6780
2	0.675266	1.1466	85	146	182	191		
2	0.676975	1.1466	85	148	181	191		
3	0.678547	1.1466	85	150	181	191	0.6780	0.6845
3	0.679383	1.1466	85	151	180	191		
3	0.681076	1.1466	85	153	180	191		
3	0.681932	1.1466	85	154	179	191		
3	0.683665	1.1466	85	156	179	191		
4	0.684541	1.1466	85	157	178	191	0.6845	0.6910
4	0.686068	1.1466	85	158	177	191		
4	0.687209	1.1466	85	160	177	191		
4	0.688303	1.1466	85	161	176	191		
4	0.689936	1.1466	85	163	176	191		
4	0.690859	1.1466	85	164	175	191		
5	0.692724	1.1466	85	166	175	191	0.6910	0.6975
5	0.693666	1.1466	85	167	174	191		
5	0.694917	1.1466	85	168	173	191		
5	0.696533	1.1466	85	170	173	191		
6	0.697503	1.1466	85	171	172	191	0.6975	0.7040
6	0.699251	1.1466	85	172	171	191		
6	0.70045	1.1466	85	174	171	191		
6	0.701446	1.1466	85	175	170	191		
6	0.703458	1.1466	85	177	170	191		
7	0.704475	1.1466	85	178	169	191	0.7040	0.7105
7	0.706527	1.1466	85	180	168	191		
7	0.708607	1.1466	85	182	167	191		
Zusätzliche Testfarben Experiment IV, Versuchsperson 1 (BBADOA)								
1	0.671055	1.1466	85	140	184	191	0.6650	0.6715
Zusätzliche Testfarben Experiment V, Versuchsperson 4 (GLBLOA)								
1	0.671055	1.1466	85	140	184	191	0.6650	0.6715
2	0.672336	1.1466	85	142	183	191	0.6715	0.6780
2	0.674462	1.1466	85	145	183	191		
2	0.676076	1.1466	85	147	182	191		

* Luminanz

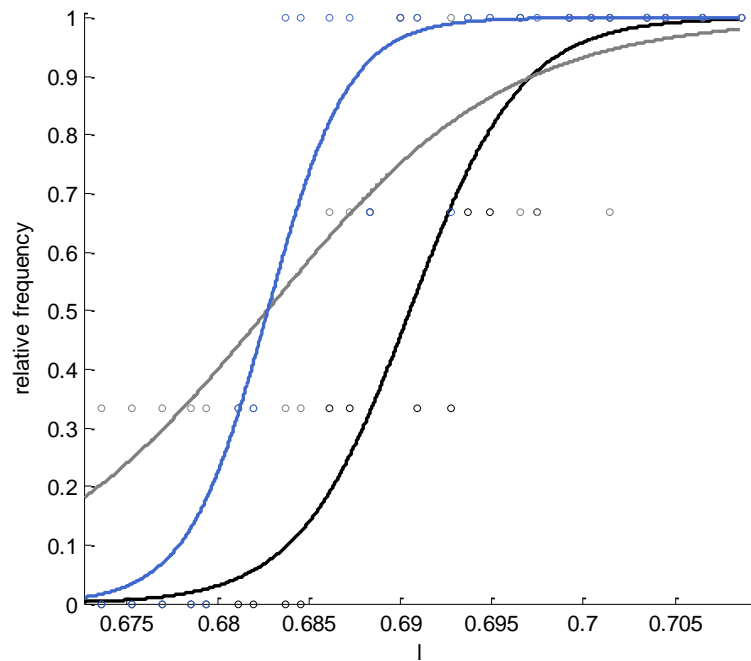
IV Intervall

UG Untergrenze

OG Obergrenze

B.6 Experiment IV. Prüfung der Angemessenheit des Testfarbensets

1 - BBADOA



2 - NMNDIA

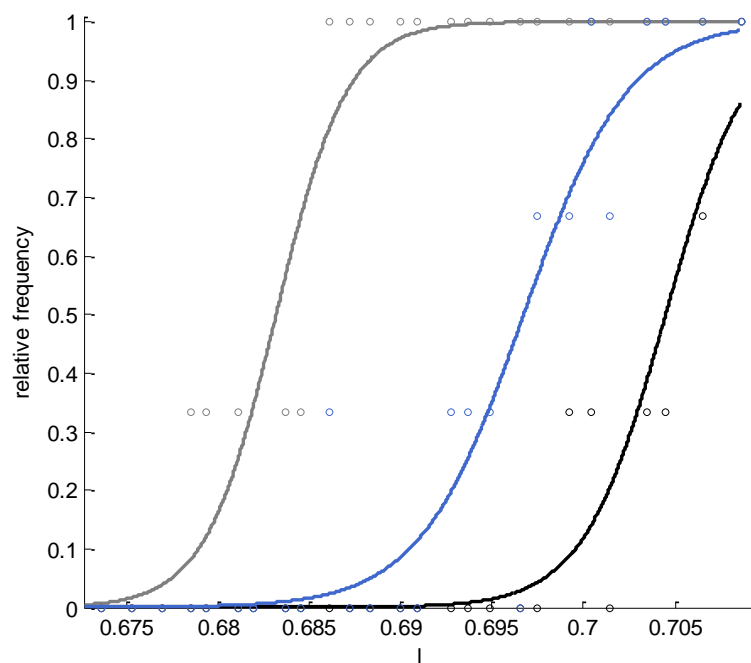
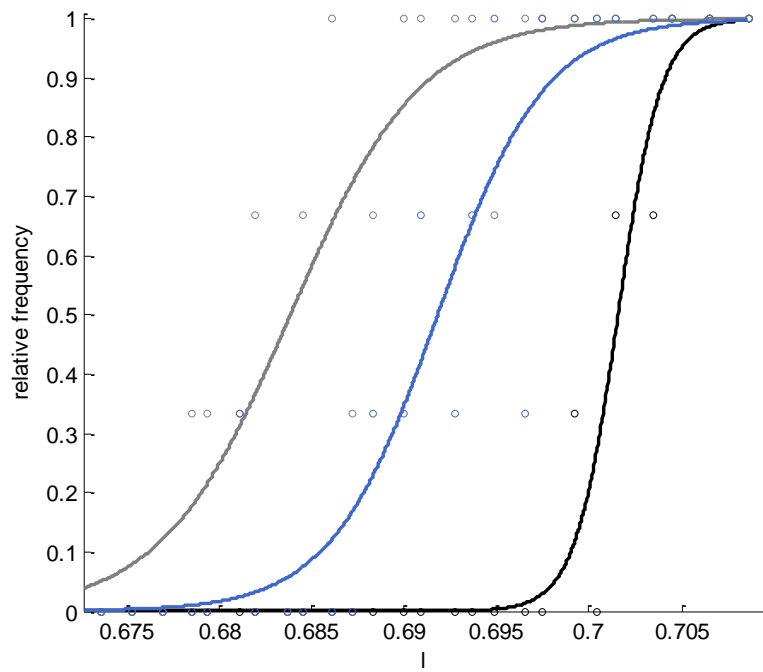


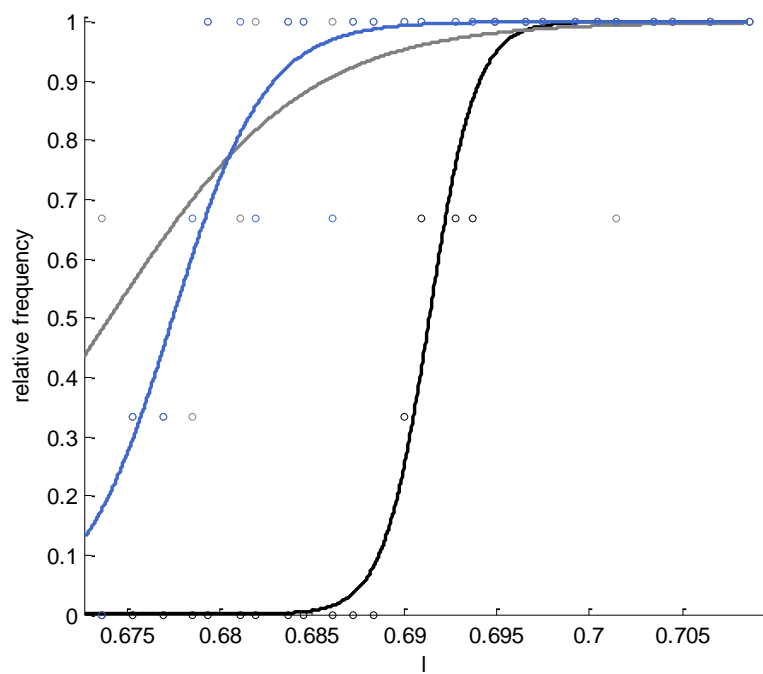
Abbildung. B6: *Experiment IV.* Ergebnisse der Prüfung der Angemessenheit des Testfarbensets nach der vierten Sitzung (Baseline rot (schwarz), Baseline grün (grau), Kontrollgruppe (blau)).

B.7 Experiment V. Prüfung der Angemessenheit des Testfarbensets

3 - BSLEIA



4 - GLBLOA



f.

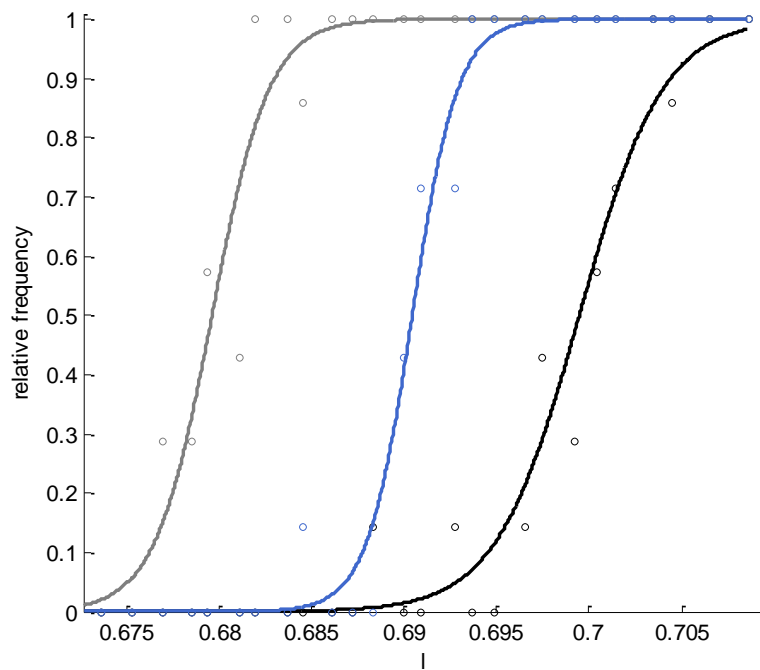


Abbildung B.7: *Experiment V.* Ergebnisse der Prüfung der Angemessenheit des Testfarbensets nach der vierten Sitzung (Baseline rot (schwarz), Baseline grün (grau), Kontrollgruppe (blau)).

B.8 Blockweise Untersuchung der Daten.

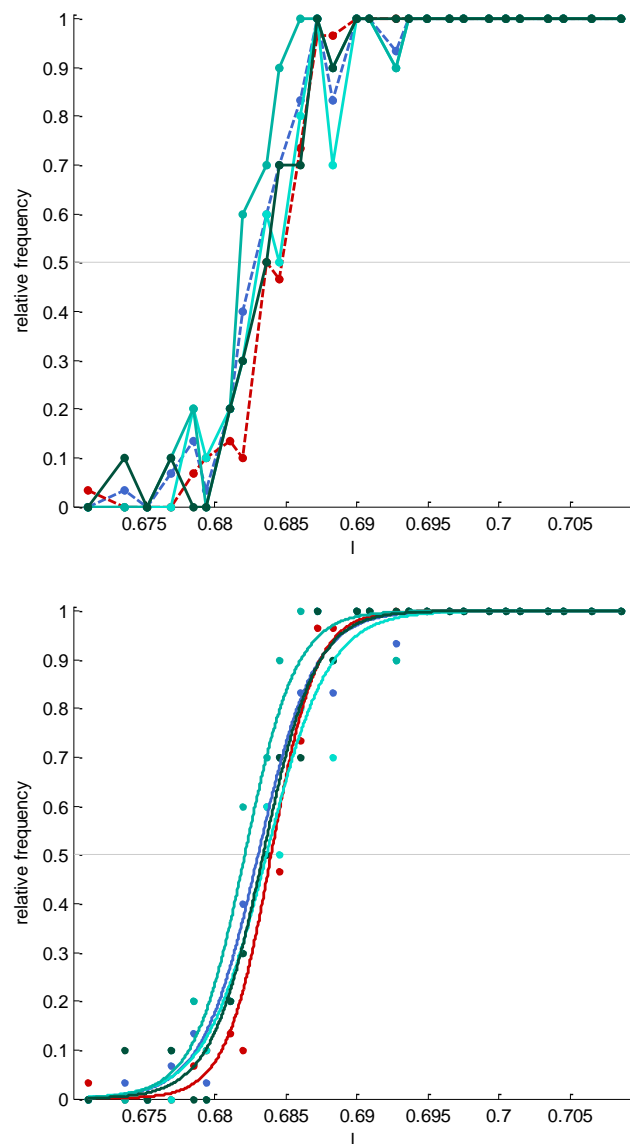


Abbildung B.8.a: Relative Häufigkeiten und angefittete psychometrische Funktionen (unten) für die gesamte Kontrollbedingung (blau), die Experimentalbedingung (rot) sowie die *Kontrollbedingung* aufgeteilt in 3 Blöcken: erstes Drittel der Messungen (hellgrün), zweites Drittel der Messungen (mittelgrün), letztes Drittel der Messungen (dunkelgrün). Die Abbildungen beruhen auf den Daten der Versuchsperson 1 (BBADOA).

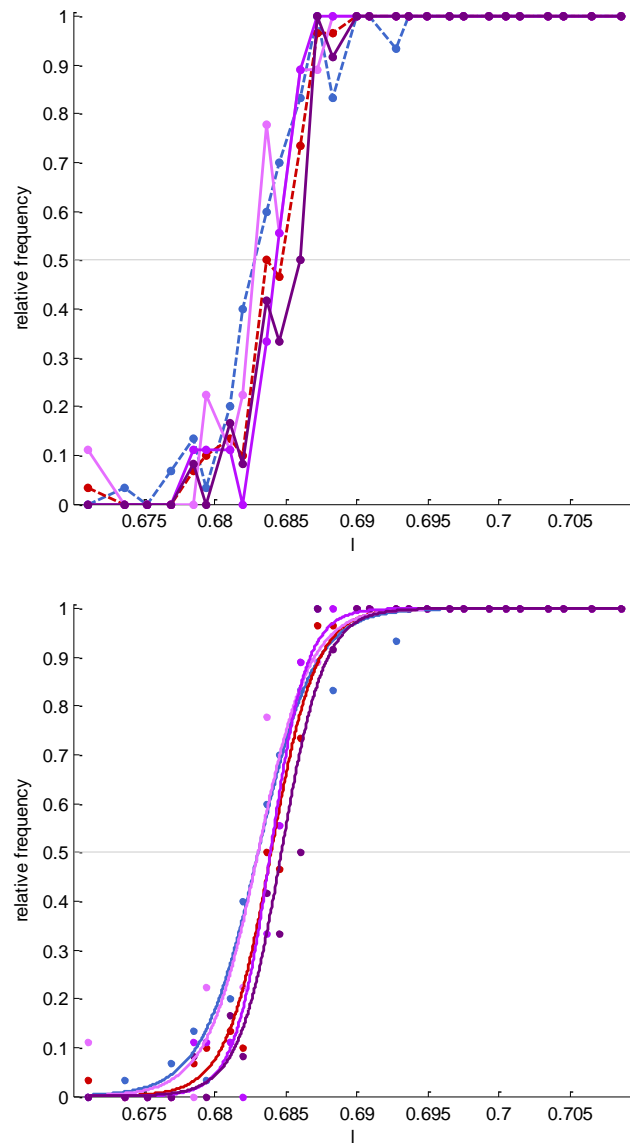


Abbildung B.8.b Relative Häufigkeiten und angefittete psychometrische Funktionen (unten) für die gesamte Kontrollbedingung (blau), die Experimentalbedingung (rot) sowie die Experimentalbedingung aufgeteilt in 3 Blöcke: erstes Drittel der Messungen (helles violett), zweites Drittel der Messungen (mittleres violett), letztes Drittel der Messungen (dunkles violett). Hierzu wurden die Daten der Versuchsperson 1 (BBADOA) verwendet.

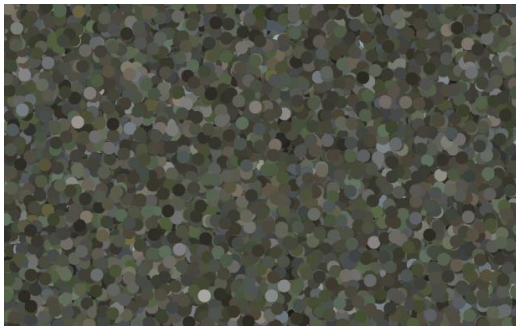
B.9 Ergebnisse *Experiment IV* und *Experiment V*. Es werden die Schätzer für Schwelle und Steigung, der fixierte Rateparameter und der fixierte Verpasserparameter, sowie die per parametrischem Bootstrap ermittelten *SEM* für Schwelle und Steigung angegeben.

	Schwelle $\hat{\alpha}$	Steigung $\hat{\beta}$	γ	λ	<i>SEM</i> Schwelle	<i>SEM</i> Steigung
Experiment IV						
1 - BBADOA						
Experimentalbedingung	0.68397	634.326	0	0	0.00026	62.97212
Kontrollbedingung	0.68306	505.210	0	0	0.00030	44.21461
Zeitkompensierte Kontrollbedingung	0.68243	590.463	0	0	0.00026	55.08606
Baseline - rot	0.68978	322.054	0	0		
Baseline - grün	0.68243	590.463	0	0		
2 - NMNDIA						
Experimentalbedingung	0.69728	653.877	0	0	0.00026	66.76561
Kontrollbedingung	0.69529	560.618	0	0	0.00028	52.38335
Zeitkompensierte Kontrollbedingung	0.69314	500.640	0	0	0.00029	43.61421
Baseline - rot	0.70557	402.430	0	0		
Baseline - grün	0.68332	452.347	0	0		

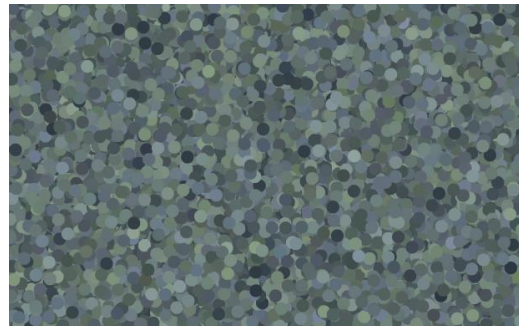
	Schwelle $\hat{\alpha}$	Steigung $\hat{\beta}$	γ	λ	<i>SEM</i> Schwelle	<i>SEM</i> Steigung
Experiment V						
3 - BSLEIA						
Experimentalbedingung rotes Aufleuchten	0.68322	784.887	0	0	0.00024	81.99108
Experimentalbedingung grünes Aufleuchten	0.68376	605.156	0	0	0.00027	58.38577
Kontrollbedingung	0.68459	456.087	0	0	0.00031	38.08381
zeitkompensierte Kon- trollbedingung	0.68388	547.044	0	0	0.00028	49.26555
Baseline - rot	0.69475	334.224	0	0		
Baseline grün	0.67863	347.672	0	0		
4 - GLBLOA						
Experimentalbedingung rotes Aufleuchten	0.67900	608.473	0	0	0.00025	56.52613
Experimentalbedingung grünes Aufleuchten	0.67977	547.137	0	0	0.00027	47.27935
Kontrollbedingung	0.68027	358.741	0	0	0.00033	27.07359
Baseline - rot	0.68984	426.299	0	0		
Baseline - grün	0.67872	316.110	0	0		
5 - RBCDIE						
Experimentalbedingung rotes Aufleuchten	0.68961	790.872	0	0	0.00023	85.70474
Experimentalbedingung grünes Aufleuchten	0.69072	641.284	0	0	0.00026	61.75669
Kontrollbedingung	0.69009	839.625	0	0	0.00023	95.12569
Baseline - rot	0.69870	536.250	0	0		
Baseline - grün	0.68087	534.231	0	0		

Anhang C

C.1 Überblick über die Oberflächenreflektanzsets. Die Sets werden bei einer natürlich berechneten Beleuchtung von CIE 7000 Kelvin dargestellt. Aus technischen Gründen kann dies natürlich nur als Anhaltspunkt dienen und keinesfalls als farbecht betrachtet werden.



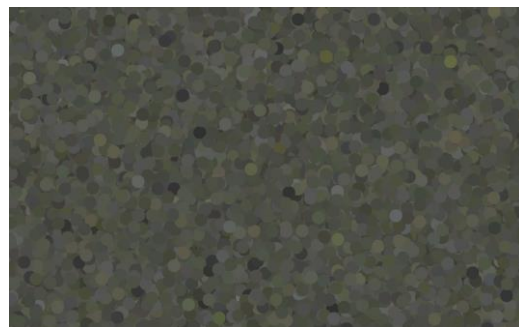
Bank



Barrine2



Cooth12



Coottha8



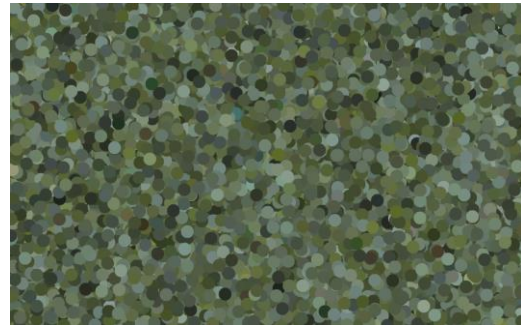
Glade



Hillside



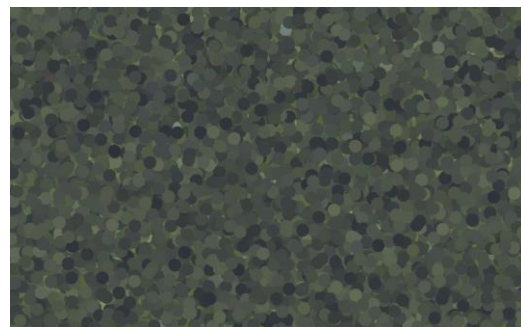
Park2



Park4



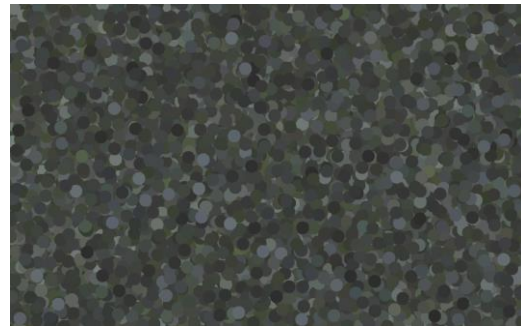
Rainfor5



Riverrd2



Treetop4



Wynnam4

Abbildung C1.1. Darstellung der 12 aus den Hyperspektralbildern von Ruderman et al. (1998) gewonnenen Oberflächenreflektanzsets unter einer nicht modifizierten Beleuchtung mit einer Farbtemperatur von CIE 7000 K. Die Bezeichnung der Sets wurde von Ruderman et al. übernommen.

C.2. Instruktion für Experiment VI.

Liebe Teilnehmerin, lieber Teilnehmer,

schön, dass Sie an unserer Studie teilnehmen! Mit diesem Experiment wollen wir erforschen, wie Menschen Beleuchtungsveränderungen wahrnehmen.

Jeder Durchgang des Experiments läuft folgendermaßen ab:

- Auf einem Bildschirm wird Ihnen ein Bild gezeigt, das sehr viele Farbscheibchen darstellt, die alle von der selben Beleuchtung beleuchtet werden. Das bedeutet, dass auf alle Farbscheibchen genau das gleiche Licht fällt und sie gleichmäßig ausleuchtet.
Dann verändert sich diese Beleuchtung ein Mal und zwar für alle Farbscheibchen gleichzeitig. Das bedeutet, alle Farbscheibchen werden nun mit einem anderen Licht gleichmäßig beleuchtet. Diese Veränderung ist der **erste Beleuchtungswechsel**.
- Nach einer kurzen Pause sehen Sie ein weiteres Beispiel, also einen **zweiten Beleuchtungswechsel**.

Aufgabe:

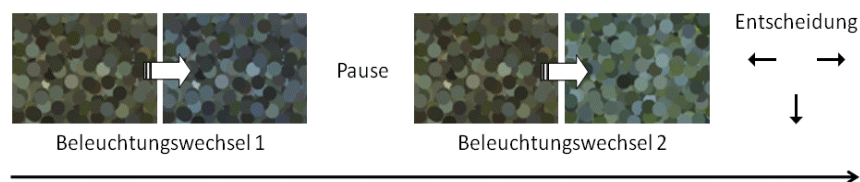
Sie sollen nun entscheiden, welcher dieser beiden Beleuchtungswechsel mehr wie ein natürlicher Beleuchtungswechsel wirkt.

Nachdem Sie beide Beispiele gesehen haben, können Sie diese Entscheidung durch folgende Tasten angeben:

- ← Pfeiltaste links: **1.** Beleuchtungswechsel sieht **natürlicher** aus
- Pfeiltaste rechts: **2.** Beleuchtungswechsel sieht **natürlicher** aus
- ↓ Pfeiltaste unten: Ich habe aus Versehen kurz weggesehen. Dieser Durchgang wird im Verlauf der Studie nochmals angezeigt.

Mit der **Leertaste** können Sie jeden Durchgang starten.

Hier der gesamte Ablauf im Überblick:



Zunächst bekommen Sie einige Übungsdurchgänge, um sich an das Experiment zu gewöhnen. Er wird dann das Experiment starten. Natürlich wird er auch Ihre Fragen beantworten. Insgesamt werden Sie heute ca. 1 Stunde benötigen. Nach Abschluss des Experiments melden Sie sich bitte wieder beim Versuchsleiter.

C.3. Abschlussfragebogen.

Ihr Code: _ _ _ _ _

Beantworten Sie bitte folgende Fragen:

Hierbei gibt es keine richtigen oder falschen Antworten. Vielmehr interessieren uns Ihre persönlichen Eindrücke:

Was haben Sie unter einem natürlichen Beleuchtungswechsel verstanden?

Bitte formulieren Sie in diesem Sinne die Aufgabenstellung um, sodass Sie präzise ihr Verständnis der Aufgabe beschreibt:

Zum Abschluss noch einige Fragen zu ihrer Person:

Geschlecht: ☐ männlich ☐ weiblich

Alter: _____

Studienfach: _____

Ich benötige ☐ eine Sehhilfe ☐ keine Sehhilfe

Ich habe während der Studie ☐ eine Brille getragen
☐ Kontaktlinsen getragen
☐ keine Sehhilfe getragen

C.4 Numerische Beschreibung der Ergebnisse aus *Experiment VI*

C4.1. Relative Häufigkeit der Bevorzugung von *XN* vor *NAT* bei einer durch relative Abweichung der Zapfenerregungen nach der Seurat-Methode berechneten Abweichung $\Delta(CER)$.

VPnr	Stützstellen ¹		
	0.005	0.015	0.025
1	0.56	0.45	0.46
2	0.50	0.49	0.43
3	0.42	0.56	0.46
4	0.36	0.54	0.64
5	0.50	0.53	0.36
6	0.50	0.43	0.39
7	0.50	0.56	0.50
8	0.42	0.53	0.61
9	0.42	0.59	0.54
10	0.44	0.63	0.57
11	0.53	0.54	0.61
alle	0.47	0.53	0.51
Anzahl Urteile	36	80	28

¹ Intervallbreite 0.01

C.4.2. Relative Häufigkeit der Bevorzugung von XN vor NAT bei einer durch $\Delta(NAT, XN)$ berechneten Abweichung.

VPnr	Stützstelle		
	0.000125	0.000375	0.000625
1	0.54	0.39	0.50
2	0.52	0.39	0.75
3	0.46	0.55	0.75
4	0.48	0.57	0.50
5	0.46	0.54	0.25
6	0.49	0.34	0.75
7	0.55	0.52	0.50
8	0.49	0.57	0.25
9	0.54	0.54	0.50
10	0.57	0.54	1.00
11	0.49	0.64	0.50
alle	0.51	0.51	0.57
Anzahl Urteile	84	56	4

C.4.3 Relative Häufigkeit der Bevorzugung von $XN\&CI$ vor XN bei einer durch $\Delta(XN\&CI, XN)$ berechneten Abweichung.

VPnr	Stützstelle	
	0.000125	0.000375
1	0.48	0.56
2	0.60	0.54
3	0.59	0.58
4	0.52	0.52
5	0.54	0.54
6	0.52	0.58
7	0.47	0.52
8	0.52	0.58
9	0.55	0.56
10	0.55	0.38
11	0.47	0.58
alle	0.53	0.54
Anzahl Urteile	96	48

C.4.4. Relative Häufigkeit der Bevorzugung von *XN&CI* vor *NAT* bei einer durch $\Delta(NAT, XN\&CI)$ berechneten Abweichung.

VPnr	Stützstelle	
	0.0000625	0.0001875
1	0.53	0.50
2	0.43	0.78
3	0.44	0.61
4	0.48	0.39
5	0.55	0.33
6	0.52	0.44
7	0.47	0.61
8	0.56	0.50
9	0.47	0.44
10	0.50	0.50
11	0.56	0.17
alle	0.50	0.48
Anzahl Urteile	126	18

C.5. Fragebogen zu Experiment VI

VPn		<i>Was haben Sie unter einem natürlichen Beleuchtungswechsel verstanden?</i>
1	LKELAC	dass die Art des Lichtwechsels bei allen (auch andersfarbigen) Punkten in dieselbe Richtung geht bzw. ähnlich und bei allen gleichfarbigen Punkten gleich stark
2	NBETAM	Entscheidend war für mich, dass sich verschiedene Farben auch unterschiedlich stark in Helligkeit und Sättigung bei einem natürlichen Beleuchtungswechsel verändern. Andernfalls entsteht der Eindruck, dass eine Art Filter wirkt.
3	NKELOA	Unter natürlichem Licht habe ich einen Wechsel der Beleuchtung ähnlich der Sonne verstanden, also kein Beleuchtungswechsel eines künstlichen Lichts.
4	NKELOK	natürlicher Beleuchtungswechsel = welcher von beiden Wechseln war harmonischer, nicht ganz so stark beim Übergang. Welche Farben passten besser zueinander?
5	NNUKWE	Eine Veränderung der Beleuchtung, wie ich sie mir unter natürlichen Bedingungen (etwa Tageslicht o. ä.) vorstellen könnte. Die zu sehenden Farben sollten z.B. keine zu hohe Differenz zeigen, wenn die Beleuchtung geändert wird.
6	RHSDET	etwas das man aus der Natur kennt z.B. Aufgang der Sonne, Sonnenuntergang, Schatten, etc. & nicht durch künstliches (z.B. Neonlicht) hervorgerufen wird oder welcher Beleuchtungswechsel war einer natürlichen am ähnlichsten.
7	RIZLAA	Relativ unauffälliger Unterschied mit nicht so großem farblichen Wechsel
8	RNUNOC	wenn die Farbübergänge zeitlich relativ "weich" gezogen (also etwas länger) waren &/oder der Farbunterschied relativ gesehen nicht so stark war
9	ZBALAA	Ein Beleuchtungswechsel, der dem von natürlichem Tageslicht gleicht, z.B. Wechsel von Tageslicht zu Dämmerung.
10	NFELEG	
11	NBEELB	Realistisch, plausibel. Möglich, dass er in der Natur vorkommt. - > Manchmal auch einfach nur "in meiner Erfahrungswelt"

VPn		<i>Bitte formulieren sie in diesem Sinne die Aufgabenstellung um, sodass sie präzise ihr Verständnis der Aufgabe beschreibt</i>
1	LKELAC	Beurteilen Sie, bei welchem Beleuchtungswechsel eine einheitliche Veränderung aufgetreten ist.
2	NBETAM	Entscheiden Sie welche Änderung des Bildes wie ein Beleuchtungswechsel wirkt und welche Änderung wie die Überblendung durch ein Filter wirkt
3	NKELOA	Welcher Beleuchtungswechsel kommt dem der Sonne am nächsten?
4	NKELOK	Bei welchen von beiden Beleuchtungswechseln ist der Übergang der Farben der schwächere / geringere?
5	NNUKWE	Eigentlich würde ich nichts umformulieren wollen, da mir auch keine explizitere Aufgabenstellung einfallen würde ...
6	RHSDet	Welcher Beleuchtungswechsel kann draußen (in der Natur) o. durch Sonnenlicht (und deren Abwendung) hervorgerufen werden oder war diesem ähnlich?
7	RIZLAA	Bewerten Sie, welcher Beleuchtungswechsel unauffälliger ist.
8	RNUNOC	Welcher der Übergänge war weicher im Bezug auf den Farbunterschied und die zeitliche Dauer des Beleuchtungswechsels?
9	ZBALAA	Welcher der 2 Beleuchtungswechsel entspricht eher dem Wechsel von bestimmtem Tageslicht.
10	NFELEG	
11	NBEELB	Bitte entscheiden Sie welche der beiden Beleuchtungswechsel eher in der Natur vorkommt

VPn		<i>Im Hinblick auf die Ergebnisse relevante Notizen des Versuchsleiters</i>
2	NBETAM	VP konnte XN Bedingung treffend beschreiben ("... wie ein Filter...")

C.6. Numerische Beschreibung der Ergebnisse aus Experiment VII

C.6.1. Experiment VII. Relative Häufigkeit der Bevorzugung von XN vor NAT bei einer durch relative Abweichung der Zapfenerregungen nach der Seurat-Methode berechneten Abweichung ($\Delta(CER)$).

VPnr	Stützstelle						
	0.025	0.045	0.055	0.065	0.095	0.115	0.165
1 GHMHTU	0.63	0.55	0.70	0.61	0.68	0.75	0.75
2 LEKLOA	0.64	0.68	0.55	0.74	0.85	0.63	0.85
3 LFEEES	0.75	0.58	0.88	0.83	0.90	0.88	0.78
4 RKILES	0.41	0.45	0.33	0.50	0.40	0.58	0.53
5 ZBDLEA	0.48	0.73	0.50	0.50	0.63	0.50	0.65
6 NBEELE	0.56	0.65	0.58	0.55	0.73	0.38	0.73
alle	0.58	0.60	0.59	0.62	0.70	0.62	0.71
Anzahl Urteile	80	40	40	80	40	40	40

C.6.2. Experiment VII. Relative Häufigkeit der Bevorzugung von XN vor NAT bei einer durch $\Delta(NAT, XN)$ berechneten Abweichung

VPnr	Stützstelle									
	0.000375	0.000625	0.000875	0.001375	0.001625	0.001875	0.002125	0.002375	0.003375	0.003875
1 GHMHTU	0.65	0.60	0.63	0.57	0.75	0.65	0.73	0.75	0.65	0.85
2 LEKLOA	0.63	0.65	0.61	0.67	0.95	0.75	0.70	0.80	0.70	1.00
3 LFEEES	0.73	0.78	0.73	0.82	0.85	0.95	0.88	0.85	0.65	0.90
4 RKILES	0.45	0.38	0.39	0.47	0.60	0.40	0.50	0.55	0.60	0.45
5 ZBDLEA	0.43	0.53	0.61	0.52	0.45	0.60	0.58	0.50	0.60	0.70
6 NBEELB	0.65	0.48	0.61	0.52	0.65	0.70	0.60	0.30	0.55	0.90
alle	0.59	0.57	0.60	0.59	0.71	0.68	0.66	0.63	0.63	0.80
Anz. Urteile	40	40	80	60	20	20	40	20	20	20

C.6.3. Experiment VII. Relative Häufigkeit der Bevorzugung von $XN \& CI$ vor XN bei einer durch $\Delta(XN \& CI, XN)$ berechneten Abweichung

VPnr	Stützstelle								
	0.000375	0.000625	0.000875	0.001125	0.001375	0.001875	0.002125	0.003125	0.003625
1 GHMHTU	0.40	0.35	0.40	0.40	0.35	0.30	0.35	0.40	0.10
2 LEKLOA	0.53	0.30	0.38	0.40	0.13	0.35	0.20	0.35	0.05
3 LFEEES	0.35	0.10	0.16	0.25	0.17	0.33	0.10	0.15	0.10
4 RKILES	0.53	0.53	0.63	0.55	0.55	0.50	0.58	0.55	0.45
5 ZBDLEA	0.38	0.43	0.40	0.55	0.50	0.53	0.43	0.50	0.25
6 NBEELB	0.43	0.35	0.41	0.55	0.48	0.50	0.55	0.45	0.15
alle	0.43	0.34	0.40	0.45	0.36	0.42	0.37	0.40	0.18
Anz. Urteile	40	40	80	20	60	40	40	20	20

C.7 Abschlussbefragung zu Experiment VII

Antworten der Versuchspersonen auf die drei Fragen des strukturierten Abschlussinterviews. Die Antworten wurden vom Versuchsleiter protokolliert und der Versuchsperson rückgemeldet.

- 1 Definition* Was haben Sie unter einem natürlichen Beleuchtungswechsel verstanden?
- 2 Aufgabe* Bitte formulieren Sie in diesem Sinne die Aufgabenstellung um, sodass sie präzise Ihr Verständnis der Aufgabe beschreibt
- 3 Tiefe* Wirkten die Stimuli dreidimensional?
- Nein
 - Ja, und zwar so, dass alle Farbscheibchen flach aufeinandergestapelt wirkten (ähnlich wie Konfettistückchen)
 - Ja, die Farbscheibchen schienen unterschiedlich weit entfernt von mir zu sein. Zwischen dem mir am nächsten liegenden und dem am weitesten entfernten war ungefähr folgender Abstand:

 - freie Antwortmöglichkeit _____

1 GHMHTU

- 1 Definition* - nicht künstlich => [also] wie man es in der Umgebung gesehen hat, wenn sich die Beleuchtung verändert / (~~man~~) die Farbe des Lichts ausgetauscht hätte, aber nicht künstlich, synthetisch.
=> ich habe versucht so zu schauen, als ob es die gleichen Punkte wären, (~~die~~) und nur die Beleuchtung sich verändert hat.
- 2 Aufgabe* schon so versucht [wie es in der Anweisung stand]
Versuche zu unterscheiden, wo sich nur die Beleuchtungsverhältnisse verändert haben.
- 3 Tiefe* Nein, hat nicht plastisch gewirkt

Bearbeitungsweise

nach einer Weile hatte ich gesehen, dass sich einige Punkte anders verändern als andere, das fand ich unnatürlich. Eine natürliche Veränderung ist gleichmäßig.

2 LEKLOA

- 1 Definition* was ich nicht als krassen Farbkontrast vom einen zum anderen sehe [...] (~~Und dass~~) z.B. beim Fernsehen, wenn ein Bild komplett anders aussehen würde und viel krassere Farben hätte als zuvor, wäre das ein unnatürlicher Beleuchtungswechsel. Natürliche Beleuchtungswechsel habe ich als weiche Übergänge gesehen
- 2 Aufgabe* Bitte beurteilen Sie welcher Bildwechsel einen weicheren Übergang darstellt.
=> natürlich im Sinne von nicht krassen Unterschieden.
- 3 Tiefe* Es kam auf die Farbkombination an. Bei bestimmten wirkte es so als ob die Farbplättchen aufeinander lagen.
=> die im Gelb-Roten (Herbstfarben) Bereich und da sah es wie Konfettischeibchen aus.

War die Aufgabe schwierig?

- - bei Grün allg. schwierig zu beurteilen, bei den farbigen leichter
- Bei manchen kam nur ein Schatten dazu, bei manchen wurden einige Plättchen hervorgehoben (z.B. Rot), das [letzteres] empfand ich als sehr unnatürlich
- Insgesamt fand ich die krassen Wechsel (wo es z.B. von olivgrün zu türkis wechselt) unnatürlich.

3 LFEEES

- 1 Definition* War mir nicht sicher. Natürlich im Sinne von in der Natur vorkommend. Vielleicht auch im Gegensatz zu künstlich. Habe versucht, das intuitiv zu machen.
- 2 Aufgabe* den BW aussuchen, der in der Natur vorkommenden Beleuchtungswechseln ähnlicher ist.
- 3 Tiefe* Nein. Wie Konfetti, aber ganz flach, wobei manchen einen andersfarbigen oder schwarzen Rand hatten
-

4 RKILES

- 1 *Definition* [Dass ein BW] nicht so neonartig scheint, es gab einen Durchgang, bei dem das lilaartig schien, das war unnatürlich [*Anm. VL: ich habe das in Bezug auf die Plättchen aufgefasst*]. Und dass der Wechsel nicht so krass war.
- 2 *Aufgabe* Beurteilen Sie [für] welche dieser Bedingungen der Beleuchtungswechsel weniger neonartig und weniger abrupt erscheint.
- 3 *Tiefe* Ab und zu bei den ganz bunten. Da sah es so aus, als ob es nach hinten weggeht – schon ein Stück weit nicht nur minimal.
Bei den grünen nicht; hatten schon Tiefe, aber nicht so, dass man es gesehen hat.

5 ZBDLEA

- 1 *Definition* Wenn ich mir vorstelle, ich sei draußen in der Natur, dass sich da dann das Licht verändert, also [*Anm. VL: im Gegensatz zu*] nicht im Gebäude
- 2 *Aufgabe* Man kann sich ja die Punkte als Blumen vorstellen ... habe ich aber nicht gemacht. Habe mir vorgestellt, draußen zu sein und ob in der Umwelt Dinge diese Farben so haben.
Wenn sich Lichtverhältnisse in der Natur verändert, dass die gezeigten BW eher dem entsprechen, was man in der Natur kennt, z.B. wenn sich Wolken vor die Sonne schieben
- 3 *Tiefe* Nein. Sie waren flach aufeinander, ohne dass man mehrere Ebenen erkennt, aber schon wie Konfetti

War die Aufgabe schwierig?

- Manche waren eindeutig
- Wenn es so richtig grell war -neonfarben-violett -, wars nicht natürlich
- Wenn beides blau war [*Anm. VL: gemeint sind die Beleuchtungswechsel*] das was blau war fand ich nicht natürlich (blau hervortretende Plättchen)
- Gelb [*Anm. VL: gemeint sind gelbe Beleuchtungswechsel*], wenn so ein sattes gelb kam [*Anm. VL: gemeint sind Plättchen*], kam mir das auch nicht natürlich vor.
- Bei manchen, die sich so ähnlich waren [*Anm. VL: gemeint sind die Beleuchtungswechsel*], war es schwierig

6 NBEELB

- 1 Definition* Ob dieser Beleuchtungswechsel auch in der Natur so vorkommen könnte. Dabei habe ich ab Mitte ini2 [der zweiten Sitzung] mich weniger auf die Gleichmäßigkeit bzw. Variation der Wirkung der Beleuchtungswechsel, sondern darauf konzentriert, ob eine Gruppen von Plättchen ihre Farbe (Relation d. Farben / Buntheit d. betrachteten Ausschnittes) behält oder ob einige sich anders verändern. => Manchmal scheinen rote Plättchen im Vergleich zu den umgebenden grünen Plättchen blasser zu werden, das ist komisch.
- 2 Aufgabe* Im Prinzip habe ich im 2. Teil die Aufgabe so umgekehrt, dass der Fokus auf der Farbkonstanz der Plättchen lag. Komisch waren einige Früchte (~~Fruits~~). Hier gab es orangefarbene Plättchen, die plötzlich zu grell wurden und fast ein bisschen selbstleuchtend wirkten. Zu Beginn war die Frage eher welcher Wechsel natürlich (draußen) plausibler wäre.
- 3 Tiefe* Ja, die Plättchen schienen unterschiedlich weit entfernt von mir zu sein. Zwischen dem mir am nächsten liegenden und dem am weitesten entfernten war ungefähr folgender Abstand: 2cm. Das variierte von Durchgang zu Durchgang zwischen Konfetti und dem o.g. 2cm Abstand
- Anmerkung* Ich finde es sehr schwierig sich an den 1. Beleuchtungswechsel zu erinnern. Im Prinzip behelfe ich mir manchmal mit einer Bewertung des 1. Beleuchtungswechsels und schaue dann, ob der 2. besser oder schlechter ist.

[] Anmerkung des VL beim Übertrag, um das Gesprächsprotokoll lesbarer zu machen

(-) Ausklammerung des notierten Texts, der Lesbarkeit wegen

* Interessante Bemerkung einer Probandin: Oft sei es schwierig gewesen, sich zu entscheiden. In diesen Situationen habe sie dazu tendiert den zweiten Beleuchtungswechsel zu bevorzugen.

C.8 Deskriptive Ergebnisse zu *Experiment VIII*

C.8.1. Relative Häufigkeit der Bevorzugung von *XN* vor *NAT* bei einer durch relative Abweichung der Zapfenerregungen nach der Methode angrenzender Flächen berechneten Abweichung ($\Delta(CER)$).

VPnr	Stützstelle									
	0.035	0.045	0.055	0.065	0.075	0.085	0.095	0.105	0.115	0.165
1 BFELEM	0.67	0.71	0.75	0.69	0.75	0.66	0.65	0.73	0.77	0.58
2 BWSKAV	0.75	0.67	0.60	0.71	0.67	0.59	0.63	0.60	0.63	0.54
3 PHMLOS	0.92	0.94	0.96	0.88	0.88	0.86	0.90	0.92	0.94	0.94
4 RLIROM	0.73	0.54	0.60	0.54	0.67	0.55	0.60	0.58	0.67	0.50
5 ZNTLOS	0.90	1.00	1.00	0.98	1.00	1.00	1.00	0.98	1.00	1.00
6 NBEELB	0.65	0.54	0.71	0.73	0.71	0.73	0.60	0.67	0.63	0.73
alle	0.77	0.73	0.77	0.75	0.78	0.73	0.73	0.75	0.77	0.72
Anz. Urteile	48	48	48	48	48	44	48	48	48	48

C.8.2. Relative Häufigkeit der Bevorzugung von XN vor NAT bei einer durch $\Delta(NAT, XN)$ berechneten Abweichung

VPnr	Stützstelle													
	0.000625	0.000875	0.001125	0.001375	0.001625	0.001875	0.002125	0.002375	0.002625	0.002875	0.003125	0.003375	0.003625	0.003875
1 BFELEM	0.33	0.70	0.75	0.71	0.66	0.61	0.81	0.77	0.69	0.50	0.67	0.67	0.50	1.00
2 BWSKAV	0.67	0.69	0.67	0.69	0.56	0.57	0.65	0.73	0.44	0.44	0.83	0.33	1.00	1.00
3 PHMLOS	1.00	0.92	0.96	0.84	0.89	0.91	0.88	0.95	1.00	1.00	0.83	1.00	1.00	0.50
4 RLIROM	0.50	0.65	0.56	0.65	0.56	0.65	0.54	0.77	0.44	0.33	0.75	0.83	0.50	0.50
5 ZNTLOS	0.83	0.96	0.99	1.00	1.00	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
6 NBEELEB	0.83	0.59	0.72	0.76	0.69	0.70	0.62	0.41	0.81	0.89	0.42	0.83	0.50	0.00
alle	0.69	0.75	0.77	0.77	0.73	0.74	0.75	0.77	0.73	0.69	0.75	0.78	0.75	0.67
Anz. Urteile	6	96	72	62	64	46	52	22	16	18	12	6	2	2

C.8.3. Relative Häufigkeit der Bevorzugung von $XN\&CI$ vor XN bei einer durch $\Delta(XN\&CI, XN)$ berechneten Abweichung

VPnr	Stützstelle											
	0.000625	0.000875	0.001125	0.001375	0.001625	0.001875	0.002125	0.002375	0.002625	0.002875	0.003125	0.003375
1 BFELEM	0.39	0.29	0.31	0.26	0.22	0.33	0.33	0.13	0.35	0.10	0.17	0.00
2 BWSKAV	0.32	0.31	0.32	0.38	0.30	0.37	0.25	0.50	0.75	0.40	0.25	0.25
3 PHMLOS	0.16	0.05	0.11	0.06	0.05	0.07	0.03	0.25	0.05	0.00	0.08	0.00
4 RLIROM	0.36	0.45	0.39	0.39	0.50	0.48	0.28	0.38	0.70	0.20	0.42	0.25
5 ZNTLOS	0.05	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00
6 NBEELB	0.30	0.29	0.31	0.33	0.34	0.35	0.44	0.38	0.05	0.10	0.58	0.25
alle	0.26	0.23	0.24	0.24	0.24	0.27	0.22	0.27	0.33	0.13	0.25	0.13
Anz. Urteile	44	80	62	82	64	54	36	8	20	10	12	4

C.9 Abschlussbefragung Experiment VIII

1. Was haben sie unter einem natürlichen Beleuchtungswechsel verstanden?

ZTNLOS	Eine homogene Veränderung, z.B. der Helligkeit oder der Sättigung
PHMLOS	Natürlich: Einheitliche Ausleuchtung der Fläche, einheitlicher Farbton; Unnatürlich: Einzelne Quadrate springen z.B. diagonal
RLIROM	Dass die Übergänge weich sind, und dass nicht zu zu knalligen Farben gewechselt wird, also dass die Abstufungen nicht zu krass sind
BWSKAV	Wenn alle Farbfelder gleichzeitig heller oder dunkler wurden. Eher wie „Sonnenlichtveränderung“
BFELEM	-wenn es aussah, als würde es in „Schatten“ fallen/wechseln, - unnatürlich, wenn sich Farbe in andere Farbe änderte, -natürlich, wenn Farbe an sich dunkler oder heller wurde → was man auch in der Natur vorfindet
NBEELB	So wie er in der Natur vorkommt, also dass die Verhältnisse zwischen Farben gleich bleiben.

2. Bitte formulieren sie in diesem Sinne die Aufgabenstellung um, sodass sie präzise ihr Verständnis der Aufgabe beschreibt:

ZTNLOS	Formulierung schon gut getroffen...Evtl. Umschreibung für Beleuchtungswechsel hinzugefügt
PHMLOS	Formulierung ist gut verständlich, gut erklärt...evtl. zusätzlich erwähnen, dass die ganze Fläche zu betrachten ist.
RLIROM	...wann die Veränderung weicher ist.
BWSKAV	Finde den Beleuchtungswechsel, der, deiner Meinung nach, natürlicher aussieht.
BFELEM	Bestimmen sie welcher Farbwechsel ein eher gewohnter Farbwechsel ist.
NBEELB	... Bei dem die Farben in gleicher Relation zueinander bleiben

3. Woran haben sie einen natürlichen Beleuchtungswechsel erkannt?

ZTNLOS	Möglichst homogene Veränderung. Wenn einzelne Quadranten herausstachen, erschien es unrealistisch.
PHMLOS	An einheitlichem Wechsel des Farbtons der gesamten Fläche.
RLIROM	An der Veränderung. Ich habe immer das mittlere Kästchen angesehen und dann die Farben drum herum betrachtet und darauf geachtet, dass die Farbveränderungen nicht zu extrem sind, also das rot nicht in blau geht sondern eher in orange.
BWSKAV	Wenn sich alle Farbfelder in der Beleuchtung verändert haben bzw. wenn es aussah, als würde mehr oder weniger Sonnenlicht darauf fallen.
BFELEM	Grundfarben un allen Kästchen gleich, werden nur dunkler oder heller. Keine „Platzwechsel“, gleichmäßiges verändern der Kästchen hat Priorität.
NBEELB	Dass Farben nicht plötzlich verwischt oder abgestumpft waren. Ich habe oft nach rot und grün geschaut, die haben die größten Veränderungen gezeigt.

4. Wie sind sie dabei vorgegangen?

ZTNLOS	Beide Beleuchtungswechsel betrachtet, dann homogenen ausgesucht. Ganze Fläche betrachtet, bei Bedarf Wiederholung gemacht.
PHMLOS	Vorbewertung: ist erster Wechsel natürlich? Wenn ja, ist zweiter genauso, besser oder unnatürlicher. Anfangs nur ein Kästchen fixiert, dann aber schnell auf gesamte Fläche geguckt.
RLIROM	Ich versuche immer nur ein Kästchen (das Mittlere) anzusehen. Die Veränderung in der Nähe nimmt man dann auch wahr. Die weiter entfernten eher entfernten eher nicht, nur wenn sie wirklich ganz stark sind, z.B. wenn weiß zu schwarz würde, würde ich das als Veränderung wahrnehmen, nicht aber, wenn weiß zu grau wird.
BWSKAV	Alle Felder gleichmäßig betrachtet, bei keinem merklichen Unterschied wiederholt.
BFELEM	Blick auf „allgemeines“, gesamtes Feld, nicht einzelne Felder fixiert, dann geguckt, ob einzelne herausstechen.
NBEELB	Habe versucht mehrere Felder anzuschauen, und besonders auf rote und grüne Flächen zu achten.

5. Wirkten die Stimuli dreidimensional?

ZTNLOS	nein
PHMLOS	nein
RLIROM	nein
BWSKAV	nein, rote Felder schienen sich manchmal hervorzuheben.
BFELEM	nein
NBEELB	nein

Anhang D

Lebenslauf

Persönliche Angaben

Name	Anna Katharina Hirschmüller
Geburtsdatum	14. 01. 1981 (Bietigheim-Bissingen)
Familienstand	ledig

Schulbildung

1991-2000	Christoph-Schrempf-Gymnasium Besigheim (Abitur)
-----------	---

Hochschulstudium

2000 – 2007	Studium der Psychologie (Diplom), Universität Mannheim
2004 – 2004	Auslandsaufenthalt zum Studium der Psychologie, Università Cattolica del Sacro Cuore, Mailand, Italien (1 Semester)
Oktober 2007	Diplom (Psychologie)
2007 – 2009	Ph.D.-Studentin der Psychologie Graduate School of Economic and Social Sciences (GESS, CDSS) Universität Mannheim
Seit 2009	Promotionsstudium im Fach Psychologie am Institut für Psychologie der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel bei PD Dr. Jürgen Golz